



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudi del trencament produït a l'abril del 2012 de la bassa de reg “el Pantà Gran” a Alcarràs

Treball realitzat per:

Jordi Clermont Feliu

Dirigit per:

Ernest Bladé i Castellet

Agustí Pere Figueras Romero

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, **octubre de 2016**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Agraïments

Al Sr. Enginyer de Camins, Canals i Ports Agustí Pere Figueras Romero, tutor extern d'aquest treball final de màster, pel constant suport, la seva exigència, l'orientació i la confiança d'acompanyar-me durant la trajectòria del treball. És d'agrair tots els seus suggeriments, correccions i plantejament de qüestions que m'han inquietat i han donat impuls a la meua constància i millora dia a dia.

Al Sr. Doctor Ernest Bladé i Castellet, tutor intern de l'Escola de Camins d'aquest treball final de màster, pel seu suport, bon tracte, l'orientació rebuda i les seves bones lliçons. Malgrat que, per qüestions laborals, m'ha resultat difícil desplaçar-me a Barcelona, és d'agrair que, en els moments en els quals he necessitat alguna cosa, el Sr. Doctor Ernest Bladé i Castellet m'ha ajudat a fi i efecte d'assolir els objectius finals previstos.

A tots aquells altres professors que han col·laborat tot aportant el seu gra de sorra en el meu estudi i, en especial, al Sr. Doctor Eduardo Alonso Pérez de Ágreda que, com a expert en mecànica de sòls i geotècnica, durant una trobada als inicis del meu treball, em va donar suport en la identificació de les diverses possibles causes del trencament del terraplè de la bassa de reg objecte d'aquest estudi.

Al Sr. Jordi Charles i Companys, gerent de l'Ajuntament d'Alcarràs, que molt amablement em va rebre al seu despatx i em va brindar l'oportunitat de conèixer el que va succeir al Terme Municipal d'Alcarràs durant el dia del trencament (20 d'abril del 2012). Així mateix, em va proporcionar la Memòria de la reparació de la bassa de reg i diverses fotografies del mateix dia del trencament i d'uns dies posteriors, que han resultat vitals per al desenvolupament del present estudi.

També vull esmentar el gran ajut de l'alcarrassí Sr. Gerard Companys Pujol que, de forma desinteressada, em va acompanyar durant el reconeixement de camp realitzat el dia 19 de febrer del 2016. Em va explicar de primera mà el que va succeir durant el dia del trencament, així com em va resultar molt més senzill orientar-me per l'extens àmbit dels fets. Igualment li regrecio el fet d'haver-me proporcionat diverses fotografies fetes per ell mateix durant el dia del trencament.

I com no, la família: els meus pares Pere i Dolors amb el seu recolzament i estímul constant. Al meu germà, Agustí i a la resta de la família.

El darrer agraïment el vull adreçar a l'Escola de Camins. Tot sovint creiem de que les universitats van per darrera de les necessitats del mercat laboral, oferint titulacions que han canviat poc al llarg dels darrers anys. En canvi, a l'Escola de Camins, i especialment en els estudis del Grau en Enginyeria Civil i del Màster en Enginyeria de Camins, Canals i Ports, sóc conscient, a partir de l'experiència laboral que tinc, de que els estudis que he realitzat em són útils al mercat laboral. Aquest fet fa que m'enorgulleixi d'haver format part de la Universitat Politècnica de Catalunya i, en especial, de l'Escola de Camins, durant tot aquest temps.

TÍTOL: ESTUDI DEL TRENCAMENT PRODUÏT A L'ABRIL DEL 2012 DE LA BASSA DE REG "EL PANTÀ GRAN" D'ALCARRÀS

Autor: Jordi Clermont Feliu

**Tutors: Ernest Bladé i Castellet
Agustí Pere Figueras Romero**

Resum

La present tesina està centrada en l'estudi del trencament del dic de contenció de la bassa de reg anomenada "el Pantà Gran", situada al terme municipal d'Alcarràs (Segrià), que va patir un episodi de trencament a causa de l'erosió interna regressiva (anomenada tubificació) en el contacte entre el terraplè de tancament i el terreny natural, produint-se el buidat accidental i relativament sobtat de la bassa. L'avinguda generada per aquest trencament va produir diverses afeccions aigua avall, entre les quals destaquen diverses vies de comunicació, enormes extensions de camps de conreu i algunes edificacions de diversos usos.

A priori de l'anàlisi hidràulica del trencament del terraplè, que conforma l'aspecte central d'interès del present treball, es fa un repàs a l'estat actual sobre el coneixement dels diferents mecanismes de trencament de basses i terraplens de materials solts, amb l'objectiu de poder contextualitzar el fenomen concret ocorregut a la bassa de "el Pantà Gran" a l'abril del 2012.

El cos central de la tesina consisteix en corroborar i contrastar els supòsits teòrics (hipòtesis i metodologies de càlcul) que s'empren en els estudis hidràulics convencionals de trencament de grans basses amb un cas real de trencament recent del qual es disposen de dades suficients (informació fotogràfica i descriptiva) per al seu contrast. Per aconseguir-ho, es modelitzen i reproduïxen hidràulicament dos escenaris de trencament, el primer dels quals consisteix en un escenari hipotètic contemplat a la "*Guía Técnica de Clasificación de presas en función del riesgo potencial*" i un segon corresponent al fenomen realment esdevingut el dia 20 d'abril del 2012. Queda demostrada, a través d'aquest cas concret d'estudi, la diferència d'escala existent, tant pel que fa a la magnitud (calat, velocitat i zones inundables), com en termes temporals d'arribada de l'ona de trencament, entre els dos escenaris de trencament estudiats.

Abstract

The current dissertation is based on the study of the earth fill embankment break of the reservoir called "el Pantà Gran", located in the municipality of Alcarràs (Segrià), that suffered an episode of rupture due to backward erosion (called piping) in the contact between the embankment and the natural terrain, producing an accidental and relatively sudden emptying of the reservoir. The flood wave generated by the dam break caused several consequences downstream, affecting various communications routes, large areas of farmland and some buildings of various uses.

Prior to the hydraulic analysis of the embankment dam break, which is the main part of the dissertation, it is reviewed the state of the art related to the different embankment dams break mechanisms, with the aim of being able to contextualize the specific phenomenon occurred in the reservoir "el Pantà Gran" in April 2012.

The main part of the dissertation consists of corroborate and verify the theoretical assumptions (hypothesis and calculation methodologies) that are used in the conventional hydraulic studies of large embankment dam breaks with a real and recent dam break case which exists sufficient data (photographic and descriptive information) for its contrast. To achieve this, two dam break scenarios are modelled and reproduced hydraulically, the first one of which is a hypothetical scenario contemplated in the Spanish law called "*Guía Técnica de Clasificación de presas en función del riesgo potencial*" and a second that corresponds to the phenomenon occurred on 20 April 2012. It is demonstrated through this case study, the existing scale difference, both in terms of magnitude (water depths, flow velocities and flood extent), and in terms of arrival time for the flood waves, between the two break scenarios studied.

**Estudi del trencament produït a l'abril del 2012 de la bassa de reg
"el Pantà Gran" a Alcarràs**

MEMÒRIA

Memòria

Taula de continguts

1. Antecedents	7
2. Objecte de l'estudi	8
3. Legislació espanyola referent a basses	9
3.1. Definició del terme "bassa"	9
3.2. Diferències entre basses i preses.....	9
3.3. Normativa que afecta a les basses.....	9
3.4. Classificació de les basses. Categories i criteris	10
4. Descripció i característiques de la bassa de reg "el Pantà Gran"	11
5. Descripció de l'àmbit d'estudi	13
6. Reconstrucció de l'episodi de trencament.....	17
7. Anàlisi geotècnica	22
7.1. Introducció	22
7.2. Conclusions extretes de l'anàlisi històrica de trencaments de preses de terres en base a l'estudi " <i>Analysis of earth dam failures - A database approach</i> "	23
7.3. Els mecanismes de trencament en preses de terres	24
7.3.1 <i>Principals trencaments de les preses de terres</i>	24
7.3.1.1 Trencament per tubificació (piping)	24
7.3.1.2 Trencament per rebasament (overtopping) de la presa	26
7.3.2 <i>Altres trencaments de les preses de terres</i>	26
7.3.2.1 Trencament per esquerdament.....	26
7.3.2.2 Trencament per lliscament de talussos	27
7.3.2.3 Trencament per sisme.....	27
7.3.2.4 Trencament per líquefacció	27
7.3.2.5 Pèrdues per filtració	27
7.4 Possibles causes del trencament de la bassa de reg "el Pantà Gran"	28
7.5 El fenomen de l'erosió interna en sòls	30
7.5.1 <i>Introducció</i>	30
7.5.2 <i>Mecanismes d'erosió del sòl en estructures de terres</i>	31
7.5.2.1 Tubificació o erosió regressiva (piping)	33
7.5.3 <i>Factors influents en el fenomen de l'erosió del sòl</i>	34
7.5.4 <i>Procediments i recomanacions pràctiques per a la prevenció de danys deguts a l'erosió del sòl</i>	35
7.6 Caracterització geomètrica i evolució temporal de l'esvoranc de "el Pantà Gran"	37

8	Anàlisi hidràulica	39
8.1	Introducció. Metodologia.....	39
8.2	Selecció del model numèric. El model hidràulic 2D Iber	40
8.3	Dades de partida.....	42
8.3.1	<i>Model Digital del Terreny.....</i>	42
8.3.2	<i>Distribució dels coeficients de rugositat de Manning</i>	43
8.3.3	<i>Inventari i modelització de les infraestructures que interfereixen amb l'espai fluvial.</i>	44
8.3.4	<i>Condicions i paràmetres dels models.....</i>	45
8.3.4.1	Condicions inicials	45
8.3.4.2	Condicions de contorn.....	45
8.3.4.3	Paràmetres de càlcul.....	45
8.4	Reproducció de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica.....	46
8.4.1	<i>Escenaris de trencament.....</i>	46
8.4.2	<i>Bretxa de trencament a analitzar.....</i>	46
8.4.3	<i>Anàlisi hidràulica de la propagació de l'ona de trencament.....</i>	48
8.4.3.1	Hidrogrames de sortida degut al trencament.....	48
8.4.3.1.1	Hidrogrames de sortida segons resultats del model bidimensional Iber	48
8.4.3.1.2	Hidrogrames de sortida obtingut a partir d'un model hidràulic propi.....	49
8.4.3.1.3	Comparació dels hidrogrames de trencament	50
8.4.3.2	Resultats. Mapa general de calats màxims	52
8.4.4	<i>Anàlisi de sensibilitat sobre la resolució en el Model Digital del Terreny.....</i>	53
8.5	Reproducció de l'esdeveniment real.....	56
8.5.1	<i>Introducció</i>	56
8.5.2	<i>Formulació del mètode desenvolupat.....</i>	56
8.5.2.1	Nivell d'aigua dins la bassa per sobre de la part superior del tub.....	56
8.5.2.2	Nivell d'aigua dins la bassa per sota de la part superior del tub	58
8.5.3	<i>Hipòtesis</i>	60
8.5.3.1	Evolució temporal del nivell d'aigua a l'interior de la bassa.....	60
8.5.3.2	Hipòtesis de creixement del tub.....	60
8.5.4	<i>Metodologia</i>	62
8.5.5	<i>Resultats gràfics</i>	64
8.5.5.1	Hipòtesi 2: Funció de creixement lineal	64
8.5.5.2	Hipòtesi 3: Funció de creixement lleugerament convexa	66
8.5.6	<i>Resultats de les modelitzacions hidràuliques.....</i>	68
8.5.6.1	Hipòtesi 2 (funció de creixement lineal) amb $C_d = 0,58$	68
8.5.6.2	Hipòtesi 3 (funció de creixement lleugerament convexa) amb $C_d = 0,58$	69
8.5.6.3	Anàlisi comparativa i conclusions.....	70
8.6	Anàlisi comparativa. Escenari contemplat a la Guia Tècnica – Esdeveniment real.....	76
9.	Documents que integren l'estudi	86
10.	Futurs estudis	87
11.	Resum final i conclusions.....	88
12.	Referències bibliogràfiques.....	95

Llistat de figures

Figura 1. Vista de l'esvoranc produït al terraplè de la bassa de reg el dia 20/04/2012 - Font: curs d'Obres Hidràuliques GEC	7
Figura 2. Ortofotografia de l'any 2012 posterior al trencament de l'àmbit de la bassa de reg - Font: IGN (PNOA)	7
Figura 3. Vista aèria de la bassa de reg "el Pantà Gran" - Font: Bing Maps	11
Figura 4. Plànol de situació general de la bassa de reg respecte als nuclis urbans - Font: elaboració pròpia	11
Figura 5. Situació de l'àmbit objecte d'estudi sobre el mapa oficial de carreteres 1:250.000 - Font: elaboració pròpia	13
Figura 6. Sector d'aigua amunt (esquerre) i d'aigua avall (dreta) de l'àmbit objecte d'estudi - Font: elaboració pròpia	14
Figura 7. Vista aèria de la bassa de reg i del traçat de la línia de ferrocarril d'Alta Velocitat - Font: elaboració pròpia	15
Figura 8. Extensos camps de conreu de regadiu i diverses edificacions d'ús agrícola/ramader - Font: elaboració pròpia	15
Figura 9. Vista aèria del traçat de l'Autovia A-2, juntament amb nombrosos camps de conreu al seu voltant - Font: elaboració pròpia	16
Figura 10. Vista aèria de la carretera N-IIa, juntament amb els camps de conreu i zones industrials adjacents - Font: elaboració pròpia	16
Figura 11. Vòrtex en la làmina d'aigua degut al trencament (5:42h) - Font: Aj. d'Alcarràs	17
Figura 12. Remolí proper a l'escullera del talús interior de la bassa (9:32h) - Font: Aj. d'Alcarràs	17
Figura 13. Vista de la bretxa des d'aigua amunt en un instant d'importants canvis (9:39h) - Font: Aj. d'Alcarràs	18
Figura 14. Vista des de l'interior de la bassa de reg de l'estat de l'esvoranc a les 10:54h - Font: Aj. d'Alcarràs	18
Figura 15. Vista de l'esvoranc des del costat d'aigua avall (27/04/2012) - Font: Aj. d'Alcarràs	18
Figura 16. Inundacions produïdes aigua amunt de l'estructura principal sota les vies de l'AVE (9:42h) - Font: Aj. d'Alcarràs	19
Figura 17. Esfondrament del pont del camí de Montagut (15:27h, 20/04/2012) - Font: Aj. d'Alcarràs	19
Figura 18. Terrenys inundats en una zona situada aigua amunt de la Sèquia dels Reguers (12:55h) - Font: Aj. d'Alcarràs	20
Figura 19. Vista de les inundacions produïdes a les edificacions d'ús agrícola/ramader situades aigua avall de l'OD_12 (esquerra) i vista de l'àmbit situat aigua amunt de l'OD_13 (dreta). Fotos realitzades a les 15:00h del dia del trencament - Font: Aj. d'Alcarràs (esquerra) i Gerard Companys Pujol (dreta)	20
Figura 20. Vista de les inundacions al voltant de la carretera N-IIa. A l'esquerra, situació a les 16:07h en el sentit d'aigua amunt de la carretera i a la dreta, vista de la zona d'aigua avall del pas inferior de vehicles - Font: Aj. d'Alcarràs (esquerra) i Gerard Companys Pujol (dreta)	21
Figura 21. Esfondrament del camí veïnal a l'alçada de l'OD_13 (17:43h del dia del trencament) - Font: Aj. d'Alcarràs	21
Figura 22. Procés d'erosió regressiva que condueix a la tubificació (piping) - Font: adaptat de Katia Nataly Carrion	24
Figura 23. Erosió interna regressiva a través de la fonamentació d'una presa de terres, assimilable al terraplè del "Pantà Gran" (Font: Dam Safety Risk Analysis Best Practices, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2010)	29
Figura 24. Forces de filtració (Font: Fenómenos de tubificación en presas pequeñas de tierra, Manuel Rayano)	30
Figura 25. Model conceptual del desenvolupament del trencament per tubificació o piping en la fonamentació d'una presa de terres (Font: Foster, 1999)	33
Figura 26. Categories d'erosió proposades per sòls i roques basades en l'esforç tallant (Font: Briaud, 2008)	34
Figura 27. Mesures per a la prevenció de l'erosió del sòl o tubificació/piping a través de la fonamentació	

permeable d'una estructura de terres (Font: Flores-Berrones and Patricia Lopez-Acosta, 2011)	36
Figura 28. Detall de la zona del terraplè oest on es va produir l'esvoranc (Font: elaboració pròpia)	38
Figura 29. Geometria i dimensions de l'estat final de l'esvoranc, segons el sentit longitudinal del trencament (Font: elaboració pròpia)	38
Figura 30. Vista aèria del Model Digital del Terreny i de l'àmbit de la modelització hidràulica (Font: elaboració pròpia)	42
Figura 31. Distribució espacial dels coeficients de rugositat de Manning en l'àmbit objecte d'estudi (Font: elaboració pròpia)	43
Figura 32. Resultat de l'edició del MDT a la zona del terraplè de les vies de la LAV (Font: elaboració pròpia)	44
Figura 33. Comparació dels hidrogrames obtinguts segons el model hidràulic propi i el model Iber (Font: elaboració pròpia)	51
Figura 34. Mapa de calats màxims. Hipòtesis de trencament segons la Guia Tècnica (Font: elaboració pròpia)	52
Figura 35. Ràster de nivells d'aigua pel cas del MDT 1x1 m ² (esquerra) i MDT 1,4x1,4 m ² (dreta) - Font: elaboració pròpia	54
Figura 36. Ràster de la diferència de nivells entre els casos MDT 1x1 m ² i MDT 1,4x1,4 m ² (Font: elaboració pròpia)	54
Figura 37. Seccions del pas inferior de la carretera N-II segons el MDT 1x1 m ² i 1,4x1,4 m ² (Font: elaboració pròpia)	55
Figura 38. Teorema de Torricelli (Font: Luis Pérez Farras, 2005)	57
Figura 39. Perfil longitudinal de la làmina d'aigua al llarg de la secció de trencament i diferents règims hidràulics segons el tram (Font: elaboració pròpia)	58
Figura 40. Hipòtesis considerades de creixement de les dimensions del tub (Font: elaboració pròpia)	61
Figura 41. Representació esquemàtica del procés de buidat de la bassa de reg degut al trencament (Font: elaboració pròpia)	63
Figura 42. Hidrograma de trencament (Hipòtesi 2) - Font: Elaboració pròpia	64
Figura 43. Nivell de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa (Hipòtesi 2) - Font: Elaboració pròpia	65
Figura 44. Velocitat de sortida de l'aigua de la bassa (Hipòtesi 2) - Font: Elaboració pròpia	65
Figura 45. Hidrograma de trencament (Hipòtesi 3) - Font: Elaboració pròpia	66
Figura 46. Nivell de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa (Hipòtesi 3) - Font: Elaboració pròpia	67
Figura 47. Velocitat de sortida de l'aigua de la bassa (Hipòtesi 3) - Font: Elaboració pròpia	67
Figura 48. Mapes de calats màxims de l'esdeveniment real (Hipòtesi 2 i $C_d = 0,58$) - Font: Elaboració pròpia	68
Figura 49. Mapes de calats màxims de l'esdeveniment real (Hipòtesi 3 i $C_d = 0,58$) - Font: Elaboració pròpia	69
Figura 50. Diferència de nivells d'aigua entre els resultats considerant la H2 i H3 de creixement de les dimensions del tub (àmbit comprès entre la bassa de reg i la LAV) - Font: Elaboració pròpia	70
Figura 51. Diferència de nivells d'aigua entre els resultats considerant la H2 i H3 de creixement de les dimensions del tub (àmbit situat aigua amunt de l'Autovia A-2) - Font: Elaboració pròpia	70
Figura 52. Zones inundables resultants de la simulació del trencament real segons la H2 i H3 de creixement de les dimensions del tub - Font: Elaboració pròpia	71
Figura 53. Hidrogrames de trencament del terraplè de la bassa de reg segons la Hipòtesi 2 i la Hipòtesi 3 de creixement de les dimensions del tub ($C_d = 0,58$) - Font: Elaboració pròpia	72
Figura 54. Zona inundable a la primera mitja hora després del trencament (esquerra) i zona inundable al cap d'una hora del trencament (dreta) – Hipòtesi 2 de creixement de les dimensions del tub (Font: Elaboració pròpia)	73
Figura 55. Zona inundable a la primera mitja hora després del trencament (esquerra) i zona inundable al cap d'una hora del trencament (dreta) – Hipòtesi 3 de creixement de les dimensions del tub (Font: Elaboració pròpia)	73
Figura 56. Vista en alçat de l'esvoranc a les 10:54 hores del dia 20/04/2012 (Font: Ajuntament d'Alcarràs) .	75
Figura 57. Nivell de la làmina d'aigua en funció del temps a l'interior de la bassa de reg considerant la	

Hipòtesi 2 i 3 de creixement de les dimensions del tub (Font: elaboració pròpia)	75
Figura 58. Diferència de nivells entre l'esdeveniment real i l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica (àmbit situat aigua avall de la bassa de reg i fins passat el terraplè de la LAV Madrid-Barcelona) - Font: elaboració pròpia.....	76
Figura 59. Diferència de nivells entre l'esdeveniment real i l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica (àmbit situat al voltant de l'Autovia A-2) - Font: elaboració pròpia	76
Figura 60. Diferència de nivells entre l'esdeveniment real i l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica (àmbit pròxim a la confluència entre la Sèquia i la riera dels Reguers) - Font: elaboració pròpia.....	77
Figura 61. Diferència de nivells entre l'esdeveniment real i l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica (àmbit situat aigua amunt de la carretera N-II) - Font: elaboració pròpia	78
Figura 62. Zones inundables resultants de la modelització hidràulica de l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica i de l'esdeveniment real (àmbit comprès entre la bassa de reg i la Sèquia dels Reguers) - Font: elaboració pròpia	79
Figura 63. Zones inundables resultants de la modelització hidràulica de l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica i de l'esdeveniment real (àmbit comprès entre l'Autovia A-2 i el riu Segre) - Font: elaboració pròpia	80
Figura 64. Hidrogrames de trencament del terraplè de la bassa de reg segons l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica i l'esdeveniment real (Hipòtesi 2 de creixement de les dimensions del tub i $C_d = 0,58$) - Font: elaboració pròpia	81
Figura 65. Zona inundable a la primera mitja hora després del trencament (esquerra) i zona inundable al cap d'una hora del trencament (dreta) – Escenari contemplat a la Guia Tècnica (Font: elaboració pròpia).....	82
Figura 66. Zona inundable a la primera mitja hora després del trencament (esquerra) i zona inundable al cap d'una hora del trencament (dreta) – Esdeveniment real (Font: elaboració pròpia)	83
Figura 67. Nivell de la làmina d'aigua en funció del temps a l'interior de la bassa de reg segons l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica i l'esdeveniment real (Font: elaboració pròpia)	83
Figura 68. Cabal de l'ona de trencament en funció del PK segons l'Escenari de trencament considerat - Font: elaboració pròpia	85

Llistat de taules

Taula 1. Tipus/mecanismes d'erosió interna (Font: adaptat de A. J. Brown, R. C. Bridle)	32
Taula 2. Propietats dels sòls influents en l'erosionabilitat (Font: Briaud, 2008).....	34
Taula 3. Síntesi del procés de desenvolupament de l'esvoranc al terraplè de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs (Font: elaboració pròpia).....	37
Taula 4. Paràmetres i característiques del trencament del dic de terres segons la Hipòtesi H1 (Font: elaboració pròpia).....	47
Taula 5. Paràmetres que defineixen l'esvoranc produït al dic de contenció segons la Hipòtesi H1 (Font: elaboració pròpia).....	48
Taula 6. Relació de valors hipotètics "temps de modelització - nivell d'aigua a l'interior de la bassa" (Font: elaboració pròpia).....	60
Taula 7. Propietats de les hipòtesis de creixement del tub (Font: elaboració pròpia).....	61
Taula 8. Característiques de l'ona de trencament a diferents seccions distribuïdes al llarg de l'àmbit d'estudi segons l'Escenari de trencament considerat - Font: elaboració pròpia.....	84

1. Antecedents

El dia 20 d'abril del 2012 la bassa de reg "el Pantà Gran", ubicada al nord del terme municipal d'Alcarràs (Segrià), va patir un episodi de trencament parcial d'un dels seus terraplens, produint-se el buidat accidental i sobtat de la bassa i les conseqüents afeccions pel front d'avinguda generat a diverses vies de comunicació, a enormes extensions de camps de conreu i a algunes edificacions de diversos usos, fins a la confluència entre la riera dels Reguers i el riu Segre.

Com s'observa, la secció del trencament va seguir, en la seva base, el contacte entre el terraplenat i el terreny natural, i va conformar un túnel de secció aproximadament semicircular d'entre 4 i 5 metres de diàmetre que travessava la totalitat del terraplè oest de la bassa en una de les seves seccions de més alçada.



Figura 1. Vista de l'esvoranc produït al terraplè de la bassa de reg el dia 20/04/2012 - Font: curs d'Obres Hidràuliques GEC

La bassa s'alimenta a partir d'una captació per gravetat al Canal d'Aragó i Catalunya, i el seu trencament pel costat oest va suposar la inundació sobtada dels conreus del voltant, desguassant l'aigua a la riera dels Reguers que és creuada per la Línia del tren d'Alta Velocitat Madrid-Saragossa-Barcelona-Frontera Francesa, que es troba emplaçada uns 310 metres aigua avall de la bassa de reg "el Pantà Gran".



Uns mesos més tard de l'episodi de trencament i en el mateix any 2012 es va procedir a la reparació del terraplè de la bassa de reg, una vegada obtinguda la Llicència d'Obres per part de l'Ajuntament d'Alcarràs.

Figura 2. Ortofotografia de l'any 2012 posterior al trencament de l'àmbit de la bassa de reg - Font: IGN (PNOA)

El fet de disposar de dades suficients per a l'estudi d'aquest cas de trencament del terraplè de la bassa de reg "el Pantà Gran", a més de la gran repercussió social i periodística que va tenir en el seu moment, ha motivat al desenvolupament d'aquest estudi d'enginyeria hidràulica.

2. Objecte de l'estudi

El present estudi consta de diverses parts que condueixen la tesina a uns objectius concrets. De forma general, s'identifiquen les diferents parts de la següent manera:

- Una primera fase de **recopilació d'informació antecedent** (cartografia i topografia, documentació i registres de l'esdeveniment del 20 d'abril de 2012 i les afeccions que va produir, etc.).
- Una segona fase de **treball de camp** per al reconeixement de les proximitats de la bassa, de les zones afectades i de les infraestructures existents. Es van prendre mides de les dimensions de totes les obres de fàbrica situades al llarg de la llera de la riera dels Reguers i es van realitzar nombroses fotos a fi i efecte de tenir constància de la situació actual de l'àmbit d'estudi.
- Una tercera fase de recopilació i anàlisi de bibliografia sobre **mecanismes de trencament de basses i terraplens de materials solts**. A partir de l'anàlisi estadístic i de la coneixença dels principals tipus de trencaments de preses de terres succeïts al llarg del temps és possible realitzar una comparació amb el trencament real del terraplè de la bassa objecte d'estudi i caracteritzar posteriorment la geomecànica del trencament real.
- El principal objectiu des del punt de vista hidràulic consisteix en **reproduir el mecanisme real de trencament** de l'estructura del terraplè de la bassa de reg, és a dir, obtenir l'hidrograma real de sortida causat pel trencament del dic de terres, a partir d'una sèrie d'hipòtesis inicials. Per a la reproducció hidràulica del procés de ruptura i conseqüent obtenció de l'hidrograma del trencament es crea un model hidràulic simplificat que, a partir de suposar un cert patró de creixement al llarg del temps de les dimensions del tub semicircular format a través del terraplè de la bassa, permet calcular el cabal de sortida en qualsevol instant de temps, a més d'altres variables com podrien ser el nivell de la làmina d'aigua dins la bassa o bé la velocitat de sortida de l'aigua per l'orifici format.
- Una vegada obtingut l'hidrograma del trencament real, es realitza un **model hidràulic bidimensional** que reproduïx l'evolució de l'ona de trencament i de les zones inundables al llarg de l'àmbit d'estudi. S'utilitza el **model hidràulic 2D Iber**, desenvolupat entre d'altres organismes i institucions per la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), ja que es tracta d'una zona planera amb un comportament difús dels fluxos que es van produir.
- L'últim dels objectius consisteix en **corroborar i contrastar els supòsits teòrics que s'empren en els estudis hidràulics de trencament de grans basses amb la realitat succeïda** (ja que es disposen de dades suficients referents al trencament real), per mitjà de la modelització hidràulica i posterior tractament dels resultats d'un cas hipotètic de trencament recollit a la *"Guía Técnica de Clasificación de presas en función del riesgo potencial"*.

En conclusió, es podria dir que **l'objectiu principal i final de la tesina és contrastar les hipòtesis i metodologies de càlcul emprades en els estudis convencionals de trencament de grans basses amb un cas real de trencament recent del qual es disposen de dades suficients per al seu contrast**. Per tal d'assolir aquest objectiu final és condició necessària realitzar un per un tots els punts descrits precedentment.

3. Legislació espanyola referent a basses

3.1. Definició del terme "bassa"

Segons el Gran Diccionari de la llengua catalana es defineix com a bassa: *"qualsevol excavació o sot gros o petit que s'omple d'aigua, especialment el destinat a recollir l'aigua de pluja, que serveix d'abeurador, de safareig o de rentador, etc."*

Així mateix, el Reial Decret 9/2008, pel que es modifica el Reglament del Domini Públic Hidràulic (1986), defineix una bassa com una *"obra hidràulica consistent en una estructura artificial destinada al emmagatzematge d'aigua situada fora d'una llera i delimitada, total o parcialment, per un dic de retenció. La seva funció principal és la d'emmagatzematge d'aigua, però ha de complir el següent:*

- *Una bassa és un element per emmagatzemar aigua que no intercepta cap curs d'aigua.*
- *Té normalment dimensions modestes.*
- *Es crea generalment per moviments de terres.*
- *S'alimenta d'aigua de forma artificial, ja sigui procedent de derivacions o impulsions des de lleres naturals, canals o pous pròxims."*

3.2. Diferències entre basses i preses

En relació als condicionants de disseny, les tres principals diferències entre basses i preses són:

1. Amb independència de si les condicions geològiques i geotècniques són favorables o desfavorables, les basses se situen en l'emplaçament que es necessiti.
2. Els dics de contenció es realitzen a partir del material excavat per a crear el vas, de forma que es procura compensar els volums.
3. Les basses en la seva majoria no tenen avingudes procedents de cursos fluvials. Tan sols s'ha de considerar la pròpia conca d'aportació.

3.3. Normativa que afecta a les basses

En l'actualitat, la normativa espanyola existent es refereix quasi exclusivament a les preses, excepte l'inclòs a la modificació del *Reglamento del Dominio Público Hidráulico* (DPH). No obstant això, la normativa de preses resulta directament aplicable a les basses només en alguns punts, com podrien ser la classificació i els mapes d'inundació.

Darrerament estan apareixent diferents guies dedicades a les basses. Això es deu, tal i com exposa la recent modificació del *Reglamento Público Hidráulico*, a que són competència de les Comunitats Autònomes i han de ser regulades encara que estiguin fora del Domini Públic Hidràulic. Per exemple, a l'abril de 2012 es va publicar la *Guía Técnica para la Elaboración de Planes de Emergencia de Balsas*, document editat i redactat per la *Subdirección General de Infraestructuras y Tecnología*. En la modificació del *Reglamento del Dominio Público Hidráulico*, aprovada pel Reial Decret 9/2008, d'11 de gener, s'inclouen expressament les basses en el seu àmbit d'aplicació, essent per tant reglamentaria la redacció de Plans d'Emergència per a les basses classificades en categories A o B front als danys potencials.

Les basses, al ubicar-se normalment fora del Domini Públic Hidràulic, mai han disposat d'una normativa de seguretat clara i explícita, pel que s'ha vingut aplicant de forma més o menys encertada la desenvolupada per les preses. Aquest fet, unit a la confusió existent pel que fa a competències i a com d'inadequat pot resultar el compliment de la normativa de preses, especialment en casos de basses de dimensions reduïdes i emplaçaments favorables, ha propiciat una excessiva relaxació per part dels propietaris en el compliment de qualsevol tipus de normativa.

Quan la construcció interromp una llera o una corrent superficial, serà d'aplicació la normativa vigent de preses i embassaments. No obstant això, en aquest cas la legislació considera que ja es tracta com si fos una presa.

A l'any 2008 es va publicar el Reial Decret 9/2008 d'11 de gener (BOE 16/01/08), pel que es modifica el Reglament del Domini Públic Hidràulic. En el mateix, destaca la inclusió d'un nou títol dedicat a la seguretat de preses, embassament i basses, en el que apareix per primera vegada una definició "legal" de basses. Es clarifiquen les competències en matèria de seguretat, assignant als òrgans designats per les Comunitats Autònomes la competència en matèria de seguretat de les preses, embassament i basses ubicats fora del Domini Públic Hidràulic.

El Reial Decret 9/2008 introdueix com a novetat respecte el Reglament i la Directriu bàsica, que només les preses i basses de més de 5 metres d'altura de dic o de capacitat d'emmagatzematge major de 100.000 m³, de titularitat privada o pública, existents, en construcció o que es vagin a construir, estaran obligades a sol·licitar la seva classificació i registre. Les basses de menys de 5 metres o 100.000 m³ no hauran de seguir les disposicions de la normativa.

Així doncs, segons l'anterior decret, la primera obligació del propietari d'una bassa, independentment de si ha de classificar-la, és registrar-la, si la bassa té més de 5 metres d'altura de dic o més de 100.000 m³ de capacitat. Un dels objectius d'aquest registre és informar al propietari de la normativa existent, així com les seves obligacions: classificació de la presa, normes d'explotació, revisions de seguretat i quan sigui procedent, pla d'emergència.

3.4. Classificació de les basses. Categories i criteris

Segons el Reial Decret 9/2008, pel que es modifica el Reglament del Domini Públic Hidràulic (1986), s'incorporen a les disposicions les basses que compleixin amb alguna de les següents condicions:

- a) Que en funció de les seves dimensions estiguin classificades com grans preses. Es considera gran presa aquella l'altura de la qual és superior a 15 m i la que, tenint una altura compresa entre 10 i 15 m, tingui una capacitat d'embassament superior a 1 hm³ (art. 358.a).
- b) Que encara no essent grans preses, en funció del seu risc potencial siguin classificades en les categories A o B, d'acord amb el que s'estableix en l'article 358.b).

A efectes de sol·licitud de classificació i registre, queden així mateix incloses en l'àmbit d'aplicació d'aquest títol les preses i basses les dimensions de les quals superen els límits establerts en l'article 367.1.

4. Descripció i característiques de la bassa de reg "el Pantà Gran"

Identificació i situació de la bassa

La bassa de reg "el Pantà Gran", destinada al reg de la que en depenen unes 700 ha de cultiu, es troba ubicada a la conca hidrogràfica del Segre, concretament al terme municipal d'Alcarràs (Lleida), en sòl classificat com a rústic. La bassa es troba a la posició X=290.424,021 m, Y=4.612.182,962 m (coordenades UTM ETRS 89 FUS 31N). En cas de trencament, la principal llera receptora és la riera dels Reguers.



Figura 3. Vista aèria de la bassa de reg "el Pantà Gran" - Font: Bing Maps

Distància a nuclis urbans

La bassa es troba allunyada dels diversos nuclis urbans de la zona, els més propers dels quals són el de Raïmat que es troba a 4,9 km (aigua amunt), el de Gimenells a 8,1 km (també aigua amunt) i el d'Alcarràs a 8,2 km (aigua avall). La resta de nuclis es troben més allunyats.

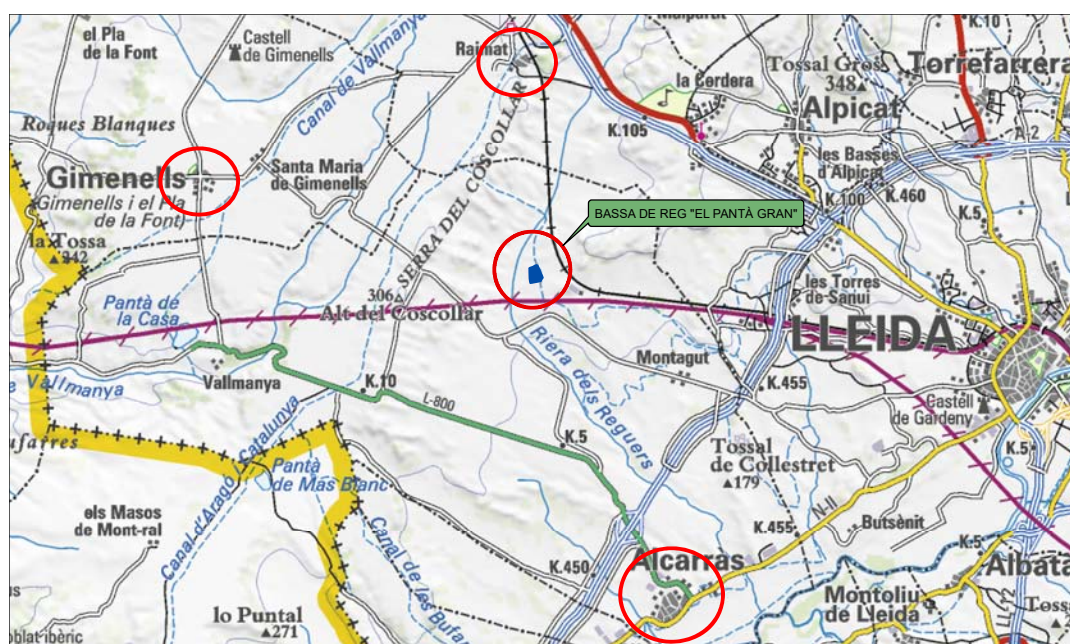


Figura 4. Plànol de situació general de la bassa de reg respecte als nuclis urbans - Font: elaboració pròpia

Tipologia del dic de contenció

- Tipologia de la bassa: bassa de materials solts homogènia.
- Descripció: el perímetre total de la bassa és de 1.403 metres, dels quals un 62% (870 metres) d'aquest corresponen al terraplè de tancament de terres compactades. El pendent és de l'1V:1,5H en el talús exterior, mentre que en el talús interior (recobert amb escullera) el pendent és 1V:2,5H.

Pel que es refereix a la impermeabilització de la bassa, aquesta no disposa de cap làmina de cautxú en els talussos interiors ni en el fons del vas. Es va optar, en aquest cas, per la utilització de materials argilosos al dic de terres i la disposició d'una capa de material drenant a la base del talús exterior del terraplè, de tal forma que les pèrdues d'aigua per filtratge es drenen fins a la riera dels Reguers mitjançant una canalització.

- Altura del dic de contenció de la bassa (m): màxim de 9,6 metres, sobre el terreny natural exterior.
- Altura des del fons de la bassa (m): 9,7 metres

Sistema d'ompliment de la bassa

- La única font d'alimentació de la bassa prové d'una captació de la variant de la Sèquia del Cap, mitjançant una conducció soterrada de 80 cm de diàmetre. El cabal màxim d'ompliment és de 395 l/s.

Òrgans de desguàs

- No disposa de cap sobreexidor en làmina lliure.
- Òrgans de desguàs de fons:
 - Descripció: dos conductes de 500 mm de diàmetre amb vàlvula amb la finalitat de controlar el cabal de sortida i poder garantir un temps mínim de buidat (un buidat massa ràpid podria crear problemes als talussos de la bassa).
 - Cota de l'eix a l'embocadura (m.s.n.m.): 217 m
 - Cabal màxim òrgans de desguàs de fons: 0,41 m³/s (individual), 0,82 m³/s (total).

Dades de l'embassament

- Cota de fons de la bassa: 217 m.s.n.m.
- Cota de cimentació de la bassa: 214,8 m.s.n.m.
- Cota del Nivell Màxim Normal: 223,9 m.s.n.m.
- Cota del Nivell de l'Avinguda Extrema: 226,7 m.s.n.m.
- Resguard de seguretat: indefinit, entre 1 i 2 m
- Volum a Nivell Màxim Normal: 430.125 m³ (capacitat funcional)
- Volum a coronació: 806.808 m³ (capacitat màxima)
- Superfície total ocupada: 15,7306 ha
- Amplada mitja camí de coronació: 5 m

5. Descripció de l'àmbit d'estudi

La bassa de reg "el Pantà Gran" i, en general, l'àmbit objecte d'estudi, es troben situats dins el terme municipal d'Alcarràs (població situada a la comarca del Segrià, província de Lleida), que té una extensió de 114 km².

A la figura de la dreta es pot observar la situació a gran escala del terme municipal d'Alcarràs i, dins d'aquest, la ubicació de l'àmbit objecte d'estudi. Pel que fa a la bassa de reg, aquesta es troba emplaçada a l'extrem septentrional de l'àmbit d'estudi, mentre que l'extrem sud de l'àmbit correspon a la confluència de la riera dels Reguers amb el riu Segre.

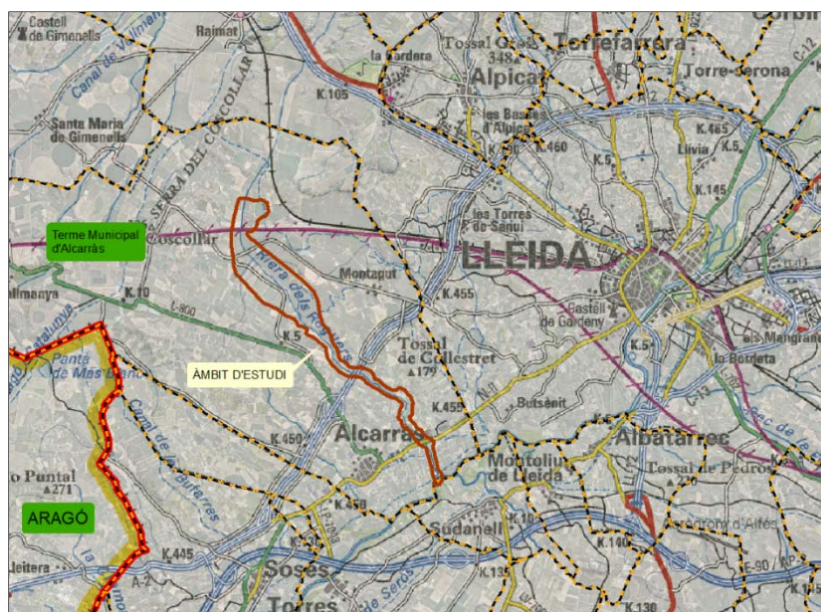


Figura 5. Situació de l'àmbit objecte d'estudi sobre el mapa oficial de carreteres 1:250.000 - Font: elaboració pròpia

El poble d'Alcarràs es troba a 137 m d'altitud, en un tossal proper a la riba dreta del Segre, al sud-est del terme, i està situat a l'extrem de ponent de la comarca del Segrià, al límit amb el Baix Cinca. El terme comprèn els pobles d'Alcarràs, cap de terme (amb 7.776 habitants a l'any 2009), Montagut i Vallmanya. Limita amb els termes de Saidí (oest) i Fraga (sud-est), ambdós del Baix Cinca, i amb els segrianencs de Torres de Segre (sud), Sudanell (sud-est), Lleida (est) i Gimènells i el Pla de la Font (nord-est).

La principal via de comunicació del terme municipal d'Alcarràs és la carretera N-IIa, que enllaça la població amb Lleida i Fraga. El modern traçat de la N-II (actual Autovia A-2), construït per evitar el pas d'aquesta per el nucli urbà de Lleida, passa a septentrí del poble. Pel sector nord-est del terme passa la via del ferrocarril de Barcelona a Madrid i el tren d'alta velocitat entre aquestes dues ciutats. Tal i com es veurà al llarg de l'estudi, aquestes infraestructures tenen especial rellevància en l'estudi hidràulic, ja que suposen una clara obstrucció al flux d'aigua.

La superfície de conreu ocupa més de tres quartes parts de la superfície municipal. El regadiu s'estén arreu del territori. Per tal d'assegurar el regatge en èpoques de sequera, el terme és ple de basses i pantans, entre els quals cal destacar el pantà de l'Arròs, el "Pantà Gran" objecte d'estudi i les basses de Don Laureà, de Teresa i de la Brisa. Els arbres fruiters, especialment el préssec, la perera i la pomera, són els conreus més destacats. També hi ha empreses no derivades de l'agricultura o la ramaderia, la gran majoria de les quals estan situades al peu de la carretera N-IIa, en diversos polígons industrials.

Feta aquesta breu descripció general de les particularitats del terme municipal d'Alcarràs, a continuació s'explica amb més detall les característiques concretes de l'àmbit objecte d'estudi.

Abans que res, però, i com a suport gràfic a la descripció literal, es mostren tot seguit dues figures que contenen, en conjunt, la totalitat de l'àmbit d'estudi. En elles s'hi representa el traçat de la riera dels Reguers, que cal tenir present que la primera part de la llera està canalitzada, amb un canal de formigó de secció triangular i, relativament a poca distància de l'Autovia A-2 s'acaba la canalització, i l'aigua de la riera passa a fluir sobre el terreny natural. Igualment s'inclou un polígon que delimita l'àmbit d'estudi.

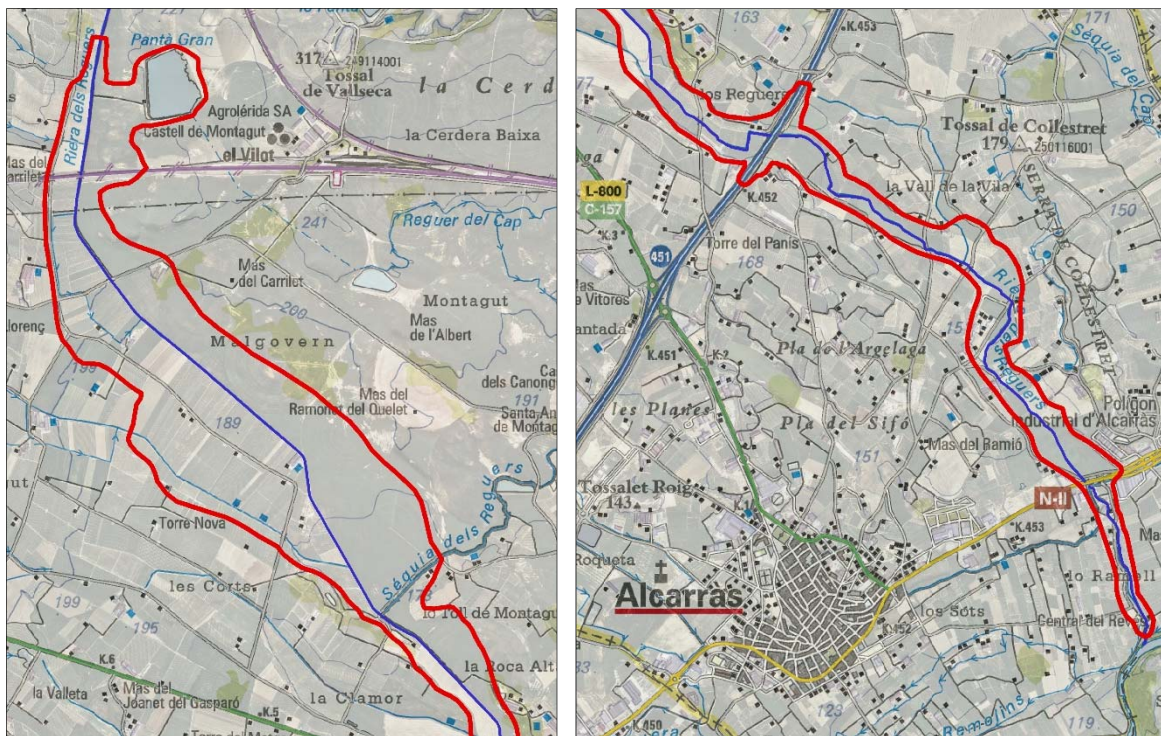


Figura 6. Sector d'aigua amunt (esquerre) i d'aigua avall (dreta) de l'àmbit objecte d'estudi - Font: elaboració pròpia

La bassa de reg "el Pantà Gran" es troba emplaçada en una zona agrícola i ramadera, en sòl classificat com a rústic, concretament es troba situada a la parcel·la 58-61-6 del polígon 7 del terme municipal d'Alcarràs. Topogràficament parlant, la bassa es troba a la falda d'una serra de cultiu, al mig de dues parcel·les de cultiu i que l'induen amb la riera dels Reguers. Respecte de la bassa, el poble d'Alcarràs es troba aigua avall d'aquesta, a una distància de 8,2 km.

El curs d'aigua superficial més proper a la bassa és la riera dels Reguers, que es troba a l'oest i a 330 metres d'aquesta. En cas de trencament de la bassa, l'aigua va a parar a la riera dels Reguers, i flueix per la llera i les planes d'inundació adjacents d'aquesta fins a la desembocadura al riu Segre, que es troba aigua avall de la carretera N-IIa. S'ha establert com a límit d'estudi aigua avall la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre perquè es considera que no existirà afecció aigua avall d'aquesta desembocadura. Així doncs, s'ha analitzat la riera dels Reguers aigua avall de la bassa, en una longitud d'aproximadament 11 km fins a la seva desembocadura al riu Segre. La zona analitzada té una superfície de 5 km² i presenta un desnivell de 91,7 metres fins al riu Segre, amb un pendent mig aproximat del 0,83%. Per a la delimitació de l'àmbit d'estudi entre la bassa de reg i la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre, s'han tingut en compte les característiques topogràfiques i morfològiques del terreny, de tal manera que si el terreny és planer, el contorn de l'àmbit s'ha allunyat considerablement de la llera, mentre que si el terreny és muntanyós o conté importants desnivells, el contorn s'ha apropat més a la llera.

Durant el dia 19 de febrer de 2016 es va realitzar una visita de camp per analitzar la situació i les principals característiques geomètriques de les infraestructures de la llera per la que s'evacua l'ona de trencament. A més, es va tenir l'oportunitat de reconèixer les proximitats de la bassa (tot i que no s'hi va poder accedir a l'interior) i, en definitiva, es van poder observar amb detall els elements més representatius de l'àmbit, tals com infraestructures lineals (carreteres, vies de ferrocarril), ponts, passos inferiors, etc.

Degut al limitat benefici de tornar a mostrar en aquest document de memòria algunes de les fotografies realitzades durant el dia de la campanya de reconeixement del terreny, a continuació es mostren algunes fotografies que permeten observar des d'una perspectiva aèria els elements més representatius de l'àmbit objecte d'estudi. No obstant això, si es desitja obtenir més informació de les particularitats de la zona, a l'Annex núm. 1 "Reportatge fotogràfic" es recull la totalitat de les fotografies que es van realitzar al llarg de la riera dels Reguers durant el dia de la visita de camp.

Així doncs, aigua avall, i suposant una trencada de la bassa, es troben diversos elements, de diferent tipologia, susceptibles de patir danys. En conjunt, els elements més significatius són els que es mostren a continuació:

- La línia de ferrocarril d'Alta Velocitat Madrid-Saragossa-Barcelona-Frontera Francesa, situada a 310 metres de distància cap al sud respecte de la situació de la bassa de reg.



Figura 7. Vista aèria de la bassa de reg i del traçat de la línia de ferrocarril d'Alta Velocitat - Font: elaboració pròpia

- Diferents edificacions/explotacions d'ús agrícola i/o ramader molt properes a la llera.

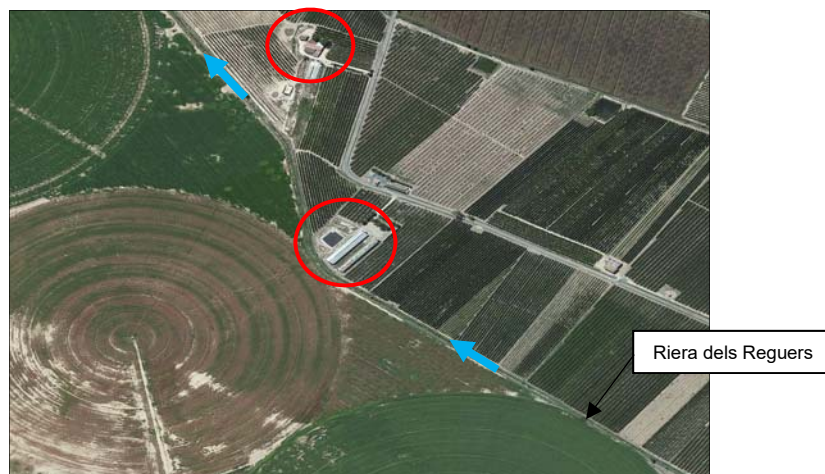


Figura 8. Extensos camps de conreu de regadiu i diverses edificacions d'ús agrícola/ramader - Font: elaboració pròpia

- Eix de comunicació viària (Autovia A-2), que comunica Lleida amb Barcelona.



Figura 9. Vista aèria del traçat de l'Autovia A-2, juntament amb nombrosos camps de conreu al seu voltant - Font: elaboració pròpia

- La carretera N-IIa és una infraestructura de gran importància al terme municipal d'Alcarràs, ja que enllaça la població amb Lleida i Fraga. A la zona d'aigua amunt s'hi concentren extensos conreus herbacis en regadiu, així com nombroses edificacions d'ús industrial per tot el seu voltant.



Figura 10. Vista aèria de la carretera N-IIa, juntament amb els camps de conreu i zones industrials adjacents - Font: elaboració pròpia

A part d'aquestes tres grans infraestructures lineals mostrades anteriorment mitjançant fotografies aèries, que tenen una gran importància en l'estudi hidràulic de propagació de l'ona de trencament, ja que actuen com si fossin preses de terres amb petites obertures, existeixen altres elements susceptibles de patir danys que tenen certa importància en el conjunt de l'estudi. Són els següents:

- Vies de comunicació: camí de Montagut i diverses carreteres veïnals pavimentades.
- Diverses edificacions d'ús agrícola/ramader/industrial dispersades per l'àmbit d'estudi.
- Habitatges/vivendes habituals, la majoria situades aigua avall de la carretera N-IIa.
- Infraestructura agrícola: canal de reg (l'anomenada sèquia dels Reguers).

6. Reconstrucció de l'episodi de trencament

A l'Annex núm. 2: *Reconstrucció cronològica de l'esdeveniment* es mostra tota la informació disponible (tant fotogràfica com descriptiva en forma de notícies de premsa) que permet reconstruir cronològicament els fets ocorreguts, conèixer el procés de trencament de l'estructura del terraplè de la bassa de reg, així com tenir idea de les diverses/os afeccions/danys que es van produir aigua avall de la bassa de reg durant el dia de l'esdeveniment de trencament del seu terraplè oest.

Per tal d'assolir els objectius finals d'aquest estudi és de vital importància disposar d'informació sobre l'esdeveniment i saber situar els fets de manera cronològica, donat que d'aquesta manera resulta possible la calibració del model hidràulic de tal forma que els resultats que s'obtinguin s'aproximin al màxim a la realitat succeïda.

Pel que fa al propi trencament del dic de contenció de la bassa de reg, es va detectar un vòrtex en la làmina d'aigua que confirmava el trencament del mur de contenció a les **5:42h** del dia 20 d'abril del 2012. Se sap que durant el dia previ al trencament, els tècnics d'explotació de la bassa de reg van detectar una fuga al peu del talús exterior a la zona on va trencar finalment. Degut a això, i a l'elevat nivell de la làmina d'aigua dins la bassa en aquell moment, van decidir posar en funcionament el sistema de bombeig, a fi i efecte d'extreure aigua i rebaixar progressivament el nivell de la làmina d'aigua present dins la bassa. Tot i això, en el moment del trencament el nivell de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa era bastant elevat, estimant-se que, a les 5:42h, es trobava a la cota 224 m.s.n.m.



Figura 11. Vòrtex en la làmina d'aigua degut al trencament (5:42h) - Font: Aj. d'Alcarràs

S'avança que el trencament del terraplè va ser provocat per un fenomen d'erosió interna en la fonamentació del dic de terres, de manera que l'aigua sortia inicialment cap a l'exterior de la bassa de reg a través d'un tub. Entre les **9:28h i les 9:32h** l'aigua encara sortia a través del tub format



inicialment, això sí, molt probablement el tub tenia unes de majors dimensions. Aquest fet es confirma a través de la fotografia de l'esquerra, on es pot observar un remolí proper a l'escullera del talús interior de la bassa. En aquests moments tan sols s'havia esquerdat i erosionat substancialment la zona situada a la vertical del camí de coronació de la bassa, fet que confirmava l'erosió interna progressiva del terraplè de la bassa.

Figura 12. Remolí proper a l'escullera del talús interior de la bassa (9:32h) - Font: Aj. d'Alcarràs

Entre les **9:32h i les 9:39h** el canvi va ser notable. La destacada erosió interna acumulada, l'elevada força de l'aigua i les esquerdes que ja hi havia en el terreny va fer que cedís gran part del material que formava el dic de contenció de la bassa. Bàsicament, però, va cedir la part que es troba sota el camí de coronació i la part del talús interior de la bassa, de tal manera que l'aigua sortia de la bassa per un tub de diàmetre considerable format a la part del talús exterior de la bassa. A les **9:39h** el nivell de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa se situava a la part inferior de l'escullera que protegeix el talús interior.



Figura 13. Vista de la bretxa des d'aigua amunt en un instant d'importants canvis (9:39h) - Font: Aj. d'Alcarràs



A les **10:54h** encara continuava sortint molta aigua, tot i que ja havia baixat substancialment el nivell d'aigua a l'interior de la bassa. La forma de la bretxa seguia tenint el mateix aspecte (secció semicircular), i només es mantenia sense derruir-se part del talús exterior de la bassa, a través d'on l'aigua sortia en làmina lliure per un tub de grans dimensions (5 metres de diàmetre).

Figura 14. Vista des de l'interior de la bassa de reg de l'estat de l'esvoranc a les 10:54h - Font: Aj. d'Alcarràs

Per mitjà de la fotografia de la dreta, feta el dia 27 d'abril del 2012, es demostra que les característiques geomètriques finals de la bretxa eren pràcticament idèntiques que les observades a les 10:54h del dia 10 d'abril del 2012 (Figura 14). Com es pot apreciar a través d'aquesta vista de l'esvoranc des d'aigua avall de la bassa, el tub format tenia una forma semicircular, de 5 metres de diàmetre aproximat, segons informació proporcionada per membres de l'Aj. d'Alcarràs.



Figura 15. Vista de l'esvoranc des del costat d'aigua avall (27/04/2012) - Font: Aj. d'Alcarràs

D'entre els danys ocorreguts just aigua avall de la zona de trencament del dic de contenció en destaquen dos: l'abatiment d'un pal d'una línia elèctrica i la destrucció de la caseta de bombes de la bassa de reg. Una altra conseqüència del trencament va ser l'enorme quantitat de sediments provinents del terraplè de terres que es van dispersar pels camps de conreu que hi ha entre la bassa de reg "el Pantà Gran" i la llera de la riera dels Reguers. Els que anteriorment al trencament eren camps de conreu verds, unes hores i fins i tot dies després eren camps coberts d'argiles.

A uns 310 metres aigua avall de la bassa de reg hi ha emplaçada la Línia d'Alta Velocitat Madrid-Barcelona, les vies de les quals es troben elevades sobre un terraplè i la riera dels Reguers passa per sota d'aquestes mitjançant una estructura de pas. Aigua amunt del terraplè es van produir importants sobreelevacions de la làmina d'aigua, que van resultar en inundacions destacades sobre diversos camps de conreu, ja que les obres de drenatge no tenen suficient capacitat hidràulica.



Figura 16. Inundacions produïdes aigua amunt de l'estructura principal sota les vies de l'AVE (9:42h) - Font: Aj. d'Alcarràs

Aigua avall de la LAV, el camí de Montagut creua la llera canalitzada de la riera dels Reguers a través d'un pont. Aquest, durant el dia del trencament, es va esfondrar en el moment en que hi circulava una furgoneta que havia saltat la balisa protectora feta pels Mossos d'Esquadra. El conductor va resultar il·lès i els Bombers van haver de retirar el vehicle de l'interior de la riera. Degut al mal estat en que va quedar el pont, es va procedir a la seva demolició. Actualment aquest pont ja s'ha reconstruït i disposa d'una secció de major capacitat hidràulica. En el passat, però, abans del seu col·lapse, tenia una secció bastant reduïda que va dificultar enormement el pas de l'aigua durant el dia del trencament. La força de l'aigua que impactava contra els estreps va provocar, molt probablement, l'esquerda de l'estrep del marge dret de la riera, just a la zona on es va esfondrar.



Figura 17. Esfondrament del pont del camí de Montagut (15:27h, 20/04/2012) - Font: Aj. d'Alcarràs

Pel que fa a l'àmbit d'estudi situat entre el pont del camí de Montagut i l'Autovia A-2, se sap que les inundacions no van produir cap mena de dany important. Es té constància, això sí, de que l'aigua va entrar dins una granja de vaques que està a tocar de la riera dels Reguers (es va evacuar el bestiar de forma preventiva). De la mateixa manera, cal destacar l'important zona

d'acumulació d'aigua en l'àmbit situat just aigua amunt del terraplè de l'Autovia A-2, degut a la presència del propi terraplè i a les limitades obres de drenatge presents per travessar el citat terraplè (dos tubs semicirculars d'uns 2,5 metres de radi cadascun). Malgrat les importants sobreelevacions produïdes aigua amunt del terraplè, se sap que l'aigua no va arribar mai a desbordar i fluir per sobre la calçada de l'Autovia A-2.



Figura 18. Terrenys inundats en una zona situada aigua amunt de la Sèquia dels Reguers (12:55h) - Font: Aj. d'Alcarràs

Es disposa de diverses fotografies realitzades a les 15:00h del dia del trencament de la zona on hi ha diverses edificacions agrupades d'ús ramader, situades aigua avall de l'OD_12 (veure plànol núm. 3 per a la seva identificació). A través d'elles es demostra que en aquest instant la punta del cabal d'avinguda ja havia passat, donat que la major part de les instal·lacions havien quedat inundades. Igualment van quedar inundats els extensos camps de conreu situats aigua avall d'aquestes edificacions, i fins a l'OD_13. Pel que fa a la petita edificació d'ús agrícola que queda a tocar de l'OD_13, aquesta es va veure clarament afectada, ja que es troba a una cota similar a la de la llera.



Figura 19. Vista de les inundacions produïdes a les edificacions d'ús agrícola/ramader situades aigua avall de l'OD_12 (esquerra) i vista de l'àmbit situat aigua amunt de l'OD_13 (dreta). Fotos realitzades a les 15:00h del dia del trencament - Font: Aj. d'Alcarràs (esquerra) i Gerard Companys Pujol (dreta)

Sense cap mena de dubte, una de les zones més castigades per les inundacions durant el dia 20 d'abril del 2012 va ser l'àmbit del Polígon Industrial d'Alcarràs i de la carretera N-IIa. Segons dades facilitades per l'Agent Rural de l'Ajuntament d'Alcarràs, i confirmades a partir de diverses fotografies disponibles del dia del trencament, a les 14:42h l'aigua ja fluïa veloçment a través del pas inferior existent sota la carretera N-IIa i s'escampava posteriorment per tota la zona de l'antiga depuradora. Per tant, doncs, en aquell instant temporal l'aigua ja s'havia escampat aigua amunt i

havia assolit la cota del pas inferior, que es troba uns 10 cm per sobre de la cota dels camps de conreu situats aigua amunt, de manera que l'instant d'arribada de l'ona del trencament a l'alçada del terraplè de la carretera N-IIa va ser una mica anterior a les 14:42h. Mitjançant la fotografia esquerra següent es pot observar com l'aigua continuava estancada i afectant a una àrea notable de camps de conreu a les 16:07h, a la zona d'aigua amunt de la carretera N-IIa. La falta de capacitat hidràulica dels dos tubs que creuen el terraplè de la carretera N-IIa va provocar que la principal via d'escapament de l'aigua fos únicament el pas inferior de la citada carretera.



Figura 20. Vista de les inundacions al voltant de la carretera N-IIa. A l'esquerra, situació a les 16:07h en el sentit d'aigua amunt de la carretera i a la dreta, vista de la zona d'aigua avall del pas inferior de vehicles - Font: Aj. d'Alcarràs (esquerra) i Gerard Companys Pujol (dreta)

Quant a la zona compresa entre la carretera N-IIa i la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre, val a dir que les inundacions van ser molt remarcables fins just aigua avall de l'antiga depuradora però que, a partir d'allà, gràcies als treballs de diferents agents (Bombers, Agents Rurals, etc.) en aixecar els marges de la llera, es va poder controlar el flux d'aigua i es va poder dotar de suficient capacitat la llera de la riera dels Reguers. Així doncs, per mitjà d'aquestes actuacions, es van evitar desbordaments en una zona problemàtica on hi ha diversos edificis i granges.

A posteriori de les inundacions ens van poder observar diversos elements danyats. A part de l'esfondrament del pont del camí de Montagut, cal destacar especialment els danys ocorreguts a l'OD_13, que va quedar totalment malmesa. Es va esfondrar el camí asfaltat que hi passa pel damunt i es va esquarterar i trencar una canonada.



Figura 21. Esfondrament del camí veïnal a l'alçada de l'OD_13 (17:43h del dia del trencament) - Font: Aj. d'Alcarràs

7. Anàlisi geotècnica

7.1. Introducció

L'Annex núm. 3: *Anàlisi geotècnica* té com a principal objectiu presentar les possibles causes o orígens del trencament de la bassa de reg "el Pantà Gran" ubicada al T. M. d'Alcarràs, així com descriure'n el procés de trencament. Un cop identificada la causa més probable, es descriu i s'analitza de forma detallada el mecanisme de trencament del terraplè de la bassa de reg (procés de tubificació/erosió interna per erosió regressiva del sòl a la fonamentació del dic de terres).

També s'hi presenta una anàlisi històrica de trencaments de preses de terres, a partir de la base de dades i resultats de l'estudi "*Analysis of earth dam failures - A database approach*", realitzat per L. M. Zhang, Y. Xu i J. S. Jia., així com s'hi presenten, s'hi analitzen i s'hi descriuen els diferents mecanismes de trencament en preses de terres.

A la present memòria es realitza una síntesi de l'Annex núm. 3, remarcant els punts més importants, de tal manera que si es desitja obtenir més informació o aprofundir en l'estudi de qualsevol dels punts desenvolupats més avall cal recórrer a l'Annex núm. 3 citat. El resum efectuat en aquesta memòria engloba els següents punts:

- S'exposen les conclusions extretes de l'anàlisi històrica de trencaments de preses de terres en base a les dades i resultats de l'estudi "*Analysis of earth dam failures - A database approach*", realitzat per L. M. Zhang, Y. Xu i J. S. Jia.
- Es descriuen els diferents mecanismes de trencament en preses de terres que, a grans trets, es poden classificar en: trencament per tubificació (*piping*), per rebasament (*overtopping*) de la presa, per esquerdament, per lliscament de talussos, degut a un sisme, per líquefacció i degut a pèrdues per filtració.
- Es presenta una sèrie de possibles causes del trencament del terraplè de la bassa de reg "el Pantà Gran", a l'hora que s'intenta determinar, a partir de la informació disponible, la causa concreta que va conduir al trencament.
- S'exposa la mecànica i d'altres característiques referents al fenomen de la tubificació o erosió interna regressiva (*piping*), tot introduint també informació referent als altres mecanismes d'erosió del sòl en estructures de terres que es coneixen en l'actualitat.
- Es posa especial atenció també en els factors influents en el fenomen de l'erosió del sòl, així com es detallen diversos procediments i recomanacions pràctiques per a la prevenció de danys deguts a l'erosió del sòl.
- Finalment, es resumeix la caracterització i evolució geomètrica de l'esvoranc al llarg del temps completament detallada a l'Annex núm. 3, cosa indispensable per a poder reproduir hidràulicament el procés real de trencament.

7.2. Conclusions extretes de l'anàlisi històrica de trencaments de preses de terres en base a l'estudi "*Analysis of earth dam failures - A database approach*"

En els últims anys, la seguretat de preses atreu cada vegada més atenció per part del públic. Això és degut al fet que les inundacions resultants del trencament de preses pot conduir a desastres devastadors amb pèrdues de vides humanes i danys a propietats, especialment en zones densament poblades. Òbviament, l'anàlisi del trencament de preses és d'enorme importància per a la prevenció i mitigació de desastres. Per tant, una comprensió sòlida de les característiques dels trencaments de preses (per exemple, el mode de trencament, la causa, i els factors clau d'influència) és necessària.

L'estudi "*Analysis of earth dam failures - A database approach*", elaborat per L. M. Zhang, Y. Xu i J. S. Jia, recull, en una base de dades, més de 900 casos de trencament de preses de diferent tipologia de tot el món excepte la Xina, amb detalls de les característiques de les preses i la informació referent al trencament. Pel que fa referència a les preses de terres, en total es comptabilitzen 593 casos de trencament recollits a la base de dades, que permet estudiar els trencaments des d'un punt de vista estadístic.

Així doncs, i sempre en base al citat estudi, sobre la base d'aproximadament 900 casos de trencaments de preses, ha estat possible interpretar els resultats estadístics de les característiques de trencament de les preses de terres. També s'han interpretat els modes i les causes dels trencaments per a una acurada classificació de les preses de terres, així com la seva relació amb les ubicacions potencials en risc. En síntesi, de l'estudi es pot concloure el següent:

- 1) Les causes més comunes de trencament de preses de terres són el rebasament (*overtopping*) i la tubificació (*piping*) en el cos o en la fonamentació de la presa.
- 2) Per a preses de material homogeni i preses zonificades de materials solts (a la Figura 2 de l'Annex núm. 3: *Anàlisi geotècnica* s'hi detallen uns esbossos amb la secció transversal dels quatre tipus típics de preses de terres), la tubificació en el cos/fonamentació de la presa és la principal causa de trencament. Tot i això, el rebasament s'identifica també com una de les causes importants de trencament.
- 3) Per preses de materials solts amb nucli, els trencaments sovint s'atribueixen al fenomen de l'*overtopping*. La tubificació al cos/fonamentació de la presa sembla ser menys probable.
- 4) Per a preses de materials solts homogènies/zonificades, els sobreeixidors, les fonamentacions i els talussos d'aigua avall, es creu que són possibles ubicacions potencials en risc pel trencament degut a *overtopping*; mentre que qualsevol part del cos/fonamentació de la presa pot ser una ubicació potencial en risc pel trencament degut al fenomen de la tubificació.
- 5) El trencament per *overtopping* en preses de materials solts amb nucli és similar a la que es produeix a les preses de materials solts homogènies/zonificades, excepte que el nucli es pot erosionar més lentament.
- 6) En el trencament per tubificació de preses de materials solts amb nucli, els fonaments o la interfície entre el terreny natural i el cos de la presa són possibles ubicacions potencials en risc; tot i que el recorregut de la tubificació pot passar també a través del cos de la presa (habitualment a causa de la fractura hidràulica del nucli).

7.3. Els mecanismes de trencament en preses de terres

7.3.1 Principals trencaments de les preses de terres

7.3.1.1 Trencament per tubificació (piping)

La tubificació és la formació, per erosió regressiva, d'un conducte a través de la presa o dels seus fonaments. La tubificació o sifonament mecànic és el problema més greu que pot provocar la ruïna d'una bassa. Això es deu a que, com les basses en prou feines tenen conca, és difícil que es produeixi un episodi de rebasament per coronació, fet que sí succeiria en les preses de terres situades a la llera d'un riu.

En el moment en que es produeix arrossegament, comença la tubificació. L'aigua flueix a través del sòl, la càrrega hidràulica es dissipa de manera que supera les forces viscoses que s'oposen al flux entre els canalicles formats per les partícules, i les partícules són arrossegades en la direcció del flux.

De forma inevitable, el flux d'aigua es concentra en determinades llocs del sòl, en els que la velocitat de filtració és major (gradient hidràulic alt). Els punts crítics són aquells en que el sòl no està confinat i emergeix l'aigua concentrada amb les partícules sòlides remogudes. Comencen a aparèixer petits canals per on circula l'aigua a major velocitat, pel que l'arrossegament és encara major. D'aquesta forma, una vegada apareguda la tubificació, augmenta el diàmetre dels canals formats i, per tant, el fenomen tendeix a créixer contínuament. Al final, es produeix el col·lapse dels talussos, donat que es produeixen forats de gran diàmetre que afecten l'estabilitat de la secció resistent al trencament.

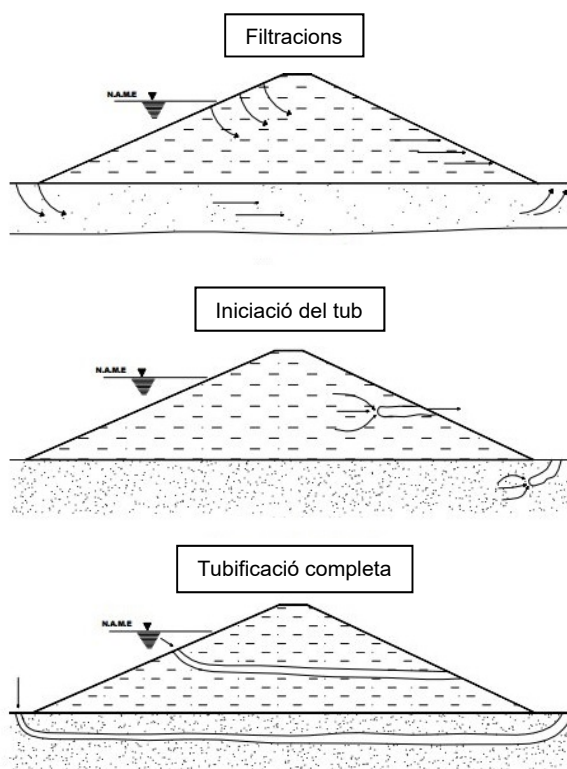


Figura 22. Procés d'erosió regressiva que condueix a la tubificació (piping) - Font: adaptat de Katia Nataly Carrion

Una compactació insuficient del terraplè contribueix de forma molt rellevant a la tubificació. Això es deu a que queda alguna capa del terraplè solta i fluixa (poc compactada). Aquest fet és bastant probable a prop de murs o superfícies de formigó, com serien conductes o tubs. A més, també és una causa important l'esquerdament de tubs o galeries a l'interior del terraplè o fonamentació.

La tubificació per sota del terraplè en el terreny natural és encara més freqüent, donat que els sòls naturals tenen una estratificació més erràtica i poden contenir estrats permeables (cas particular de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs objecte d'estudi). Per aquesta raó, es recomana utilitzar elements contra les infiltracions, de manera que es talli el flux de filtració a través d'estrats permeables (per exemple sorres) que es troben a la fonamentació.

Per tal d'evitar la tubificació, cal utilitzar sòls fins plàstics (alta resistència a l'arrossegament) en que les partícules quedin travades, homogenis, amb un pes suficient, així com es recomana enormement utilitzar filtres graduats aigua avall. No obstant això, s'haurà d'evitar la utilització d'argiles dispersives, és a dir, les que posseeixen un alt contingut de sodi en l'aigua intersticial, ja que aquest tipus de sòl s'erosiona mitjançant un procés en el que les partícules col·loides de les argiles queden en suspensió en l'aigua d'infiltració, provocant el trencament per sifonament, encara sota gradients hidràulics baixos i filtres correctament dissenyats.

Solucions

En funció de les condicions del terreny, el trencament es pot produir a la fonamentació o en el cos de la presa (en el contacte amb la fonamentació és una zona dèbil). Per aquesta raó, amb la finalitat de reduir el sifonament, s'exigeixen especificacions respecte a la humitat i el pes específic sec pels sòls en contacte amb les estructures de formigó (zones on preferentment passa el fenomen).

També es requereix que el terraplè sigui homogeni, amb la finalitat d'evitar zones potencials de flux. D'aquesta forma, es redueix la possibilitat que es produeixi tubificació a través del terraplè. No obstant això, per evitar la tubificació a la presa, s'han de tenir en compte els següents aspectes:

- a) A poder ser, s'han d'utilitzar sòls plàstics amb un Índex de Plasticitat superior a 15, ja que són resistents a l'arrossegament de partícules i, per tant, a la tubificació.
- b) Amb la finalitat d'aconseguir que les partícules quedin travades, s'ha de compactar el terraplè per tongades en capes de poc espessor amb una alta energia de compactació.
- c) S'ha de compactar amb humitats en un rang de $\pm 2\%$ pel que fa a la humitat òptima del Proctor Normal (PN) i amb graus de compactació per damunt del 90% d'aquesta energia (recomanable el 98% PN).
- d) En el cas de que s'utilitzin sòls amb un Índex de Plasticitat inferior a 15 (propensos a la tubificació), obligatòriament s'haurà d'aplicar una energia de compactació alta.

En definitiva, en la construcció s'exigeix: homogeneïtat del terraplè, humitat i energia de compactació idònies, disseny i mesures modernes que evitin el trencament. Tot i això, altres mesures recomanables són:

- Disminuir el gradient hidràulic (i) a la presa, ja sigui tallant el flux de filtració o allargant aquest flux amb estructures.
- Controlar la sortida de filtracions en el peu i sobre el talús, amb la finalitat d'assegurar-se que no es produeixen arrossegaments de sòl (baixa l'erosionabilitat). Això s'aconsegueix mitjançant la col·locació de drenatges de filtre invertit.

És particularment necessari reduir a valors mínims els gradients a fonamentacions amb sals solubles en els que l'aigua afavoreix el procés de dissolució.

Cal recordar que, de manera prèvia a la construcció, s'han de realitzar assajos del sòl, de manera que s'estigui segur de que no hi ha presència de sòls dispersius (amb la presència de sodi).

7.3.1.2 Trencament per rebasament (overtopping) de la presa

Aquest trencament seria de tipus estructural. En les preses de terres resulta catastròfic que l'aigua desbordi la presa i flueixi aigua avall del talús. Això es deu a que els materials que componen la presa són erosionables. Per aquest motiu, s'ha de proveir la presa d'un sobreeixidor, compost de materials no erosionables com el formigó o la maçoneria, que desguassa l'embassament quan es troba proper a la seva capacitat màxima. El sobreeixidor ha de desguassar correctament la màxima avinguda de disseny.

Un altre motiu que podria causar el trencament per rebasament de la presa és l'assentament excessiu de la fonamentació i el terraplè. És per això que s'ha de preveure el recreixement de la presa.

Cal destacar, però, que aquest mode de trencament amb prou feines afecta a les basses, ja que per definició estan situades fora del Domini Públic Hidràulic (DPH). A més, la majoria se situen de forma estratègica, de forma que quasi no tenen conca aportadora i, per tant, tampoc avingudes.

Com a mesures preventives, s'han de realitzar estudis de les conques vessants i dels escorriments, així com càlculs hidrològics moderns amb un gran número de dades, en el cas de preses situades dins del DPH. A través dels estudis geològics s'ha d'esbrinar si es produeix un assentament excessiu dels fonaments i la presa. En cas afirmatiu, s'hauran de col·locar bermes aigua amunt i aigua avall, amb l'objectiu de distribuir les càrregues en una àrea major. D'aquesta forma es redueixen els esqueraments interiors a la presa. Finalment, es podria prendre la decisió d'abandonar la presa, amb la finalitat de trobar un terreny de fonamentació més ferm.

Altres possibles trencaments de preses de terres per erosió externa poden ser a causa de les onades, que poden erosionar el talús d'aigua amunt, o bé degudes a l'erosió de la superfície del talús d'aigua avall per l'escorrentia superficial provinent de la pluja o la neu fosa.

7.3.2 Altres trencaments de les preses de terres

Degut a la menor freqüència d'ocurrència d'aquests tipus de trencaments, tot seguit només es detallen els aspectes més destacats de cadascun d'ells. No obstant això, si es desitja obtenir més informació, als apartats corresponents de l'Annex núm. 3 es descriuen i s'analitzen tots i cadascun d'aquests trencaments d'una forma molt més extensa i precisa.

7.3.2.1 Trencament per esquerament

Aquest tipus de trencament està causat per assentaments diferencials en les preses de terres. Possiblement són més nombroses del que es creu, donat que molts trencaments produïts per tubificació tenen el seu origen en l'aparició d'esquerdes i fissures de reduïdes dimensions en el cos del terraplè.

L'esquerament es produeix en el moment en que la deformació de la presa produeix zones de tracció (apareixen per assentaments diferencials del sòl), ja sigui per deformació del propi cos del terraplè o del terreny de la fonamentació. Les esquerdes poden ser pràcticament de qualsevol tipus, paral·leles o transversals a l'eix de la presa, en qualsevol pla d'orientació, amb amplades de fins a 15 o 20 cm (generalment són d'1 o 2 cm).

Les preses d'altura reduïda pateixen aquest fenomen de manera més freqüent, encara que també succeeix en les parts altes de les preses altes. Així mateix, les esquerdes més perilloses són les que es formen transversalment a l'eix de la presa. Això és degut a que creen una zona de concentració de flux.

Per evitar aquest tipus de trencament és important compactar amb energies de compactació baixes (similars a les del Proctor Normal), ja que si s'augmenta l'energia de compactació en un sòl, per a una certa humitat, es disminueix la flexibilitat del material compactat i augmenta la vulnerabilitat a l'esquerdament.

7.3.2.2 Trencament per lliscament de talussos

Aquest tipus de trencament és probablement el més documentat i estudiat en les preses de terres. Per aquesta raó, cada vegada es prenen més mesures i succeeix en menor mesura en les noves preses. Amb la finalitat d'evitar aquest tipus de trencament s'hauran d'utilitzar, en la mesura del possible, sòls granulars (bona resistència a l'esforç tallant), o bé efectuar talussos menys verticals.

Els trencaments per lliscament solen succeir durant tres fases: durant la construcció, a llarg termini (embassament ple, en fase d'explotació) o durant un desembassament/buidatge ràpid (la velocitat màxima admissible de desembassament ha d'estar relacionada amb la capacitat de drenatge/permeabilitat del material de la presa).

7.3.2.3 Trencament per sisme

En zones d'activitat sísmica, s'hauran de tenir en compte els efectes sobre la presa. S'estudiarà la influència del terratrèmol sobre l'estabilitat i quines mesures es poden prendre per pal·liar els danys.

Encara que difícilment un terratrèmol pot provocar la destrucció total d'una presa de terres, pot produir trencaments per rebasament al produir assentaments en la coronació, líquüefacció de materials dels fonaments i la presa, esquerdament del cos de la presa, activació de trencaments geològics, onatges que poden portar al rebasament, etc.

Per aquesta raó, es recomana el següent: considerar un resguard major de la cota de coronació, major amplada de la coronació i talussos més estesos i utilitzar materials resistents a l'esquerdament.

7.3.2.4 Trencament per líquüefacció

Per evitar-lo, s'ha de seleccionar la ubicació del dic de tancament i els materials adequats (plàstics) per evitar l'existència de sòls fins, no cohesius, d'estructura solta i saturats. Per aquesta raó, s'agafen mostres i s'estudien els materials dels fonaments i del terraplè en les diverses fases.

7.3.2.5 Pèrdues per filtració

Previ a la construcció cal realitzar un estudi del terreny per emplaçar idòniament el dic de terres, amb la finalitat de trobar trencaments, zones càrstiques, sòls permeables, presència de guixos solubles; que puguin propiciar la infiltració d'aigua a través de la fonamentació o del terraplè.

7.4 Possibles causes del trencament de la bassa de reg "el Pantà Gran"

Segons informació proporcionada per membres de l'Ajuntament d'Alcarràs, se sap que un dia abans del trencament es va observar una fuga a la part baixa del talús del terraplè del costat oest de la bassa, que anava augmentant a mesura que passaven les hores. La nit abans del trencament els tècnics d'explotació van decidir procedir al buidat de la bassa a través del bombeig existent, i a mesura que baixava la cota de la làmina d'aigua anaven observant un remolí en l'interior de la bassa situat aproximadament al peu del talús interior del terraplè del costat oest, en la seva secció de més alçada. El dia 20 d'abril del 2012 al matí la bassa va trencar de forma sobtada deixant un esvoranc de forma semicircular d'uns 5 metres de diàmetre a la part baixa del terraplè que travessa tota l'esmentada secció. Se sap també que abans de detectar les fuites no havien detectat ni humitats al peu exterior del talús ni cap altre símptoma de que hi pogués haver alguna patologia estructural.

La bassa de reg, previ al trencament, no disposava de cap sistema d'auscultació, pel que a banda de les inspeccions visuals no es duïen a terme mesures concretes de moviments relatius ni de filtracions. Pel que fa al drenatge de la bassa, donada l'absència de material geotèxtil o similar, presentava una consistència dura i absolutament obturada.

Segons diverses observacions, existia una cuneta lateral que delimitava el camí d'accés a la caseta de bombeig en el seu contacte amb el terraplè afectat. La part baixa d'aquesta cuneta, en les immediacions de l'esvoranc, presentava un aspecte humit i hi havien crescut canyissars de naixement recent, el que podria indicar l'existència d'una superfície de traspuament a la part baixa del talús del terraplè, fenomen que es dona quan la línia piezomètrica puja per un mal funcionament del sistema de drenatge.

Aigua amunt de l'esvoranc, en el peu del talús interior, es va observar un forat o clot en la solera produït per erosió, d'una profunditat de com a màxim 0,5 m i un diàmetre d'aproximadament 1 m. Sembla ser que la situació d'aquest clot coincideix amb la situació del remolí que va veure el personal encarregat de l'explotació de la bassa en la làmina d'aigua hores abans del trencament del dic de terres.

Aigua avall de la bassa, a banda de diversos desperfectes i destrosses, es va observar un altre forat o clot que podria tractar-se d'una surgència per on podria haver començat el trencament. És important destacar també que a la secció on es va produir l'esvoranc s'observava la presència d'arrels de la vegetació present en el talús d'aigua avall. Per la mida de les arrels, però, sembla que aquestes no van poder ésser les causants del trencament.

Així doncs, la forma de l'esvoranc, els indicis d'humitat a diverses zones, els diversos clots observats, les característiques constructives i geològiques de la bassa i de la bretxa de trencament, així com la inspecció visual realitzada a partir de les fotografies disponibles, **semblen indicar que el trencament de la bassa es va desencadenar a partir d'una filtració al voltant de la zona de contacte entre el terraplè i el terreny natural en una de les seccions de més alçada de terraplè. El recorregut d'aquesta filtració sembla tenir l'inici en el punt a la vertical on s'observà el remolí dins la bassa, i el final en el punt situat aigua avall de la bassa on se sap que va existir una surgència. El creixement per erosió de la via de filtració molt probablement va provocar la fallida del terraplè.**

No obstant això, amb el que s'ha citat fins al moment caldria més informació per poder afirmar amb seguretat les causes de l'aparició de l'esmentada filtració. Amb la informació disponible es poden indicar dues anomalies que podrien haver estat, de forma independent o combinades, les causants de l'aparició d'una via preferent de filtració:

- Un mal funcionament del sistema de drenatge i evacuació de les filtracions de la bassa: la colmatació del material drenant del peu del talús exterior de la bassa i l'absència de material geotèxtil o similar que el protegeixi, així com la superfície de traspuament observada a la part baixa del talús, pot indicar l'augment de la línia piezomètrica en la part exterior del talús per un mal drenatge, podent aquest fenomen propiciar la necessitat de l'aigua de buscar vies alternatives de dissipació de pressions.
- Heterogeneïtat, composició i variacions en la permeabilitat del material del terraplè: l'existència de capes i fragments d'altres materials diferents a l'argila compactada i més concretament les alternances de capes i fragments d'un material blanquinós que podria ésser **guix fibrós**, podria indicar la presència de processos de dissolució que han pogut conformar una via preferent de pas de l'aigua.

Gràcies a la col·laboració de l'Ajuntament d'Alcarràs, s'ha pogut tenir accés a la Memòria de reparació del terraplè de la bassa de reg, que va ser redactada el maig del 2012. L'objecte del citat document era el de sol·licitar davant l'Ajuntament d'Alcarràs la Llicència d'Obres per a la reparació del "Pantà Gran". Dins d'aquest document es fa referència a les causes del trencament, causes concloses a partir d'un estudi geotècnic del terreny dut a terme un temps després del trencament.

Així doncs, d'acord a les anàlisis del terreny, realitzades per tècnics i emprant el resultats obtinguts, en resulta que el material del dic es trobava format per argiles i la base de la bassa per argiles sota les quals existeix un terreny amb continguts en guix, tot i que aquests, segons determinacions tècniques, no van ésser les causes del trencament.

Durant les penetracions i presa de mostres es va poder observar l'existència d'una capa de diferent permeabilitat que va ser travessada per la làmina d'aigua generant un tub. L'aigua passant al seu través va aconseguir erosionar el material provocant que el dic es trenqués per la zona debilitada.

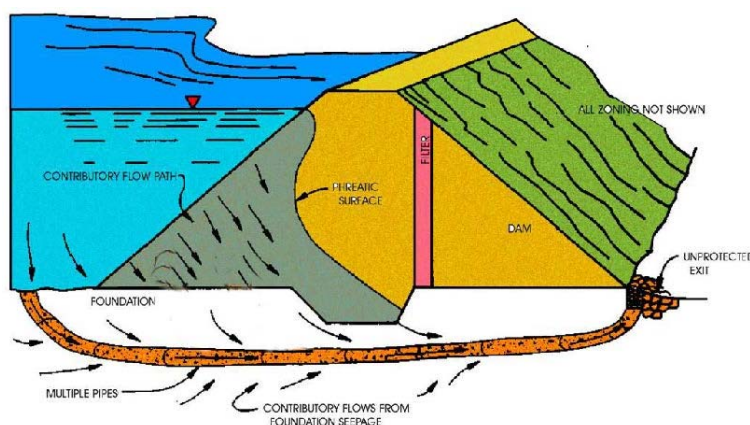


Figura 23. Erosió interna regressiva a través de la fonamentació d'una presa de terres, assimilable al terraplè del "Pantà Gran" (Font: Dam Safety Risk Analysis Best Practices, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2010)

La presència d'aquesta capa de diferent permeabilitat en el terreny natural sota el terraplè es pot explicar des d'un punt de vista de les característiques topogràfiques del terreny natural previ a la construcció de la bassa de reg. Se sap que la zona del terraplè a on es va produir el trencament correspon a un antic aiguafons que acabava desguassant l'aigua a la riera dels Reguers. Això implica que la formació superficial present en aquella zona es pot assimilar a una terrassa al·luvial, que presenta **alta permeabilitat**, alta porositat, una estructura estratificada i alta compressibilitat.

7.5 El fenomen de l'erosió interna en sòls

7.5.1 Introducció

A partir de diverses anàlisis efectuades en el terreny proper a la zona del trencament s'ha conclòs que a la zona de la fonamentació del dic de terres existia una capa de diferent permeabilitat que va ser travessada per la làmina d'aigua generant un tub. L'aigua, passant al seu través, va aconseguir netejar el material provocant que el dic es trenqués per la zona debilitada. Atenent a la descripció anterior, doncs, queda clar que el trencament es va produir a causa de la formació d'un conducte o tub a partir d'un procés d'erosió interna regressiva des d'aigua avall cap aigua amunt en la zona de fonamentació del dic de terres.

Sempre que es construeix una presa de materials solts s'hauria de tenir en compte un principi bàsic: els sòls tendeixen a erosionar-se quan l'aigua flueix sobre o a través d'ells. Fins aproximadament l'any 1930, es posava especial èmfasi en evitar les filtracions. Posteriorment, i després de nombrosos estudis i tesis, es va demostrar que era impossible evitar-les, per la qual cosa es va canviar l'enfocament i es va passar al control de les fissures per a prevenir problemes d'erosió interna i tubificació.

El flux d'aigua tendeix a exercir pressió sobre les partícules del sòl, i la força de filtració actuant, definida per unitat de volum, pot arrastrar-les en el sentit de la corrent. Les forces que s'oposen a l'arrossegament del flux és l'estructura entre les partícules i la seva cohesió, però a l'emergir aigua avall de la presa, és el pes submergit del sòl la principal força en sentit oposat (almenys en sòls sense cohesió).

El sentit de la força de filtració segueix el de les línies de flux, i en el seu origen, quan l'aigua penetra en el sòl, té el mateix que el del pes de les partícules, però l'erosió es veu impedita per la massa del sòl. En canvi, a l'emergir aigua avall, tenen sentits oposats, i allà no existeix cap massa que s'oposi a l'erosió. Quan l'àrea de la secció transversal està restringida, com per exemple per sota de les palplanxes, la velocitat, la força de filtració i el gradient augmenten.

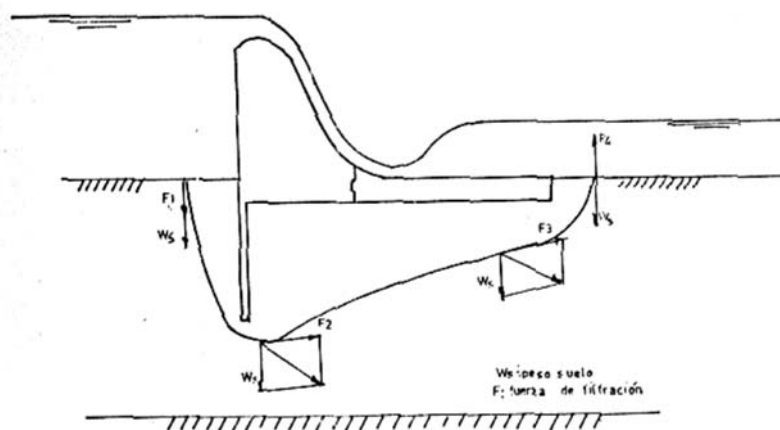


Figura 24. Forces de filtració (Font: Fenómenos de tubificación en presas pequeñas de tierra, Manuel Rayano)

Hi ha zones d'una presa de terres més propenses que d'altres a la iniciació de fissures: masses mal compactades, contacte de la presa amb obres de formigó com sobreeixidors, conductes, etc., les vores del nucli, paraments de les preses homogènies no drenades i zones dèbils o anòmales del substrat (fonament). Els assentaments diferencials poden produir també esquerdes o fissures que poden donar lloc a un pas d'aigua preferencial.

7.5.2 Mecanismes d'erosió del sòl en estructures de terres

L'erosió en estructures de terra a causa d'un flux d'aigua es produeix quan les forces resistents a l'erosió són inferiors a les forces de filtració que tendeixen a produir-la, de tal manera que les partícules de sòl són retirades i transportades juntament amb el flux d'aigua. Les forces resistents depenen de la cohesió, l'efecte d'enclavament, el pes de les partícules del sòl i el tipus de protecció existent aigua avall, en cas d'existir. Atès que la filtració a través d'una estructura de terres no és uniforme, el fenomen d'erosió incrementa on existeix una concentració de filtració i velocitat d'aigua; en indrets on aquesta concentració emergeix al costat d'aigua avall, les forces erosives a les partícules de sòl poden esdevenir molt importants.

D'acord amb Fell *et al.* (2005), en el seu llibre de text sobre l'enginyeria geotècnica de les preses, han d'existir quatre condicions per tal que es pugui produir erosió interna i tubificació. Aquestes són:

- 1) Ha d'existir una trajectòria de fluxos de filtracions i una font d'aigua.
- 2) Hi ha d'haver materials erosionables dins de la trajectòria del flux i aquest material ha de ser transportat pel flux de filtracions.
- 3) Ha d'haver una sortida sense protecció, de la qual el material erosionat pugui escapar.
- 4) Per formar un tub, el material en el qual s'està formant el tub, o el material immediatament de sobre, ha de ser capaç de formar i suportar un sostre per al tub.

Aquest procés d'erosió pot esdevenir de qualsevol fissura que existeixi a l'estructura de terres, degut a assentaments diferencials, moviments sísmics, tensions de tracció, o forats causats per arrels seques o animals rosegadors (conills, rates, etc.). L'existència de fissures és també deguda a la contracció d'assecat o inflament a causa de la saturació. Existeixen també condicions favorables per a l'erosió interna en els contactes entre sòls i parets rígides, estructures de formigó, a la interfície amb el substrat rocós dels fonaments, etc. Les àrees amb presència de l'efecte arc són també molt susceptibles a l'erosió interna. En tots els casos precedents, si les tensions efectives verticals es redueixen per l'efecte del flux d'aigua, llavors la fissura existent podria propagar-se de tal manera que crearia el fenomen de la **fractura hidràulica**.

Al 1967 Sherard *et al.* van publicar una taula que dona una relació empírica unívoca entre la resistència al fenomen del *pipiing* en preses de terres i els tipus de sòls. Aquesta taula indica que els sòls amb una major resistència a la tubificació són les argiles d'alta plasticitat i ben compactades, els intermedis són la sorra grollera ben graduada i les mescles de grava i sorra, i els de menor resistència a la tubificació o *pipiing* són les sorres fines uniformes sense cohesió.

L'erosió del sòl en estructures de terres, particularment en preses de terres, pot succeir a través del terraplè, dels fonaments o des del terraplè als fonaments. Aquest tipus d'erosió té les següents fases: a) iniciació i continuació de l'erosió, b) progressió per formar un tub, i c) formació d'una bretxa (Fell *et al.*, 2003). La iniciació de l'erosió del sòl normalment comença al punt de sortida de les filtracions d'aigua, i una **erosió regressiva** resulta en la formació d'un tub. L'extracció d'una petita porció del terraplè o fonamentació per una acció erosiva en qualsevol punt, particularment a la part de sortida del talús d'aigua avall, accentua la subseqüent concentració de filtracions i forces erosives en aquesta zona.

Aquest efecte, degut a les fuites d'aigua concentrades, varia d'alguna manera del que s'anomena **tubificació en sòls dispersius** (*suffusion* en anglès) o inestabilitat interna, el que implica el moviment intern de partícules de sòl degut als ajustaments o sòls internament inestables; aquest és el cas de sòls porosos graduats o sòls molt graduats, com ara sorres grolleres i grava amb petites quantitats de sòls fins.

A la següent Taula 1 es presenten i resumeixen els quatre tipus o mecanismes d'erosió interna en estructures de terres, recollits a la publicació del 22 de gener del 2013 de la ICOLD titulada *Internal erosion of existint dams, levees and dikes, and their foundations*.

Tipus	Definició
Ruptura o fractura hidràulica <i>(Concentrated erosion)</i>	En sòls susceptibles de contenir una esquerda oberta, o en els buits/porus interconnectats en una zona permeable contínua. L'erosió es produeix al llarg del perímetre de l'esquerda (o porus) on l'esforç tallant (velocitat) supera el valor crític. Nota: amb fluxos poc importants pot haver-hi fuites sense erosió.
Erosió en sòls dispersius - Sufusió <i>(Suffosion)</i>	L'erosió de massa en els sòls que són internament inestables (s'anomenen sòls internament estables els que no s'erosionen a causa d'un flux de filtracions). Les partícules fines són transportades pel flux de filtracions entre els porus de les partícules de sòl més grans. Aquest fenomen es pot evitar si el sòl té una distribució de la mida de les partícules ben graduada amb porus suficientment petits.
Tubificació o erosió regressiva <i>(Backward Erosion – Piping)</i>	L'erosió s'inicia en el punt de sortida; es desenvolupa un pas continu (tub) per erosió regressiva quan el gradient de les filtracions supera o excedeix el gradient hidràulic crític ("gradient de flotació") del sòl.
Erosió per contacte <i>(Contact Erosion)</i>	Erosió al contorn o interfície horitzontal d'un sòl fi que recobreix un sòl groller, on el sòl fi és remogut cap al sòl groller a causa d'un flux horitzontal.

Taula 1. Tipus/mecanismes d'erosió interna (Font: adaptat de A. J. Brown, R. C. Bridle)

El grup de treball especialitzat en l'erosió interna de sòls fundat l'any 1993 anomenat European Working Group on Internal Erosion (EWGIE) especifica, en el document titulat *Ensuring reservoir safety into the future*, que per a una avaluació de la seguretat envers l'erosió interna és necessari disposar de dades, i d'un model analític, en les següents quatre grans àrees:

- Geometria de la presa.
- Geologia de la fonamentació.
- Paràmetres geotècnics dels sòls que formen la presa i la seva fonamentació.
- Paràmetres hidràulics de permeabilitat i erosionabilitat dels sòls, i condicions de contorn per als anàlisis de filtracions i fluxos d'aigua.

A continuació es passa a explicar de forma més detallada el mecanisme d'erosió interna de tubificació o erosió regressiva especificat a la Taula 1 anterior, donat que és el mecanisme que es va desenvolupar a l'estructura de terres de la bassa de reg "el Pantà Gran" objecte d'aquest

estudi. Si es desitja aprofundir en la resta dels mecanismes d'erosió interna identificats a la Taula 1 precedent, en l'Annex núm. 3 es dedica un apartat per a cadascun d'ells. Val a dir que la comprensió de l'erosió interna ha progressat significativament en els últims anys, però que malgrat això encara s'estan desenvolupant nombrosos estudis i investigacions a fi i efecte de perfeccionar en la coneixença del fenomen de l'erosió interna. En qualsevol cas, les eines/descripcions que es proporcionen serveixen clarament com a base sòlida per a quantificar la vulnerabilitat a l'erosió interna dels sòls.

7.5.2.1 Tubificació o erosió regressiva (piping)

La tubificació regressiva es pot produir en, pràcticament, tots els sòls (en els no cohesius si algun estrat o estructura impedeix l'enfonsament del tub), des d'aigua avall cap aigua amunt, seguint preferentment el camí de concentració de les línies de filtració. El conducte es forma per les zones geològicament més dèbils, per plans d'estratificació permeables, o en qualsevol altra zona de concentració del flux on l'energia arriba sense sofrir grans pèrdues degut a la fricció (Figura 25).

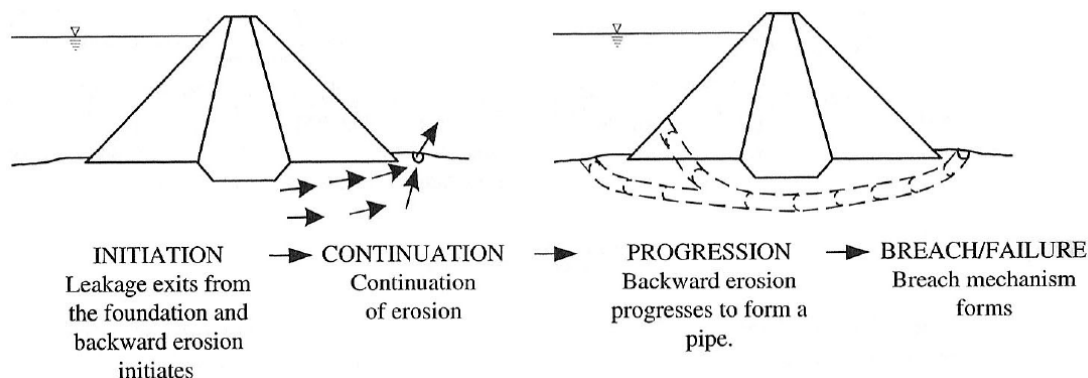


Figura 25. Model conceptual del desenvolupament del trencament per tubificació o piping en la fonamentació d'una presa de terres (Font: Foster, 1999)

Per una anàlisi detallada, el factor de seguretat contra el fenomen de l'erosió o tubificació regressiva es calcula a partir de les pressions intersticials al peu de la presa, calculades o obtingudes ja sigui amb piezòmetres, o a partir d'un anàlisi detallat de filtracions. No obstant això, per a un anàlisi preliminar, es poden utilitzar gradients mitjans al llarg de tota la longitud de la trajectòria de trencament potencial. Els gradients mitjans crítics pel fenomen de tubificació van ser donats per Blight (1910), Lane (1935) i més recentment per Weijmers and Sellmeijer (1993). Aquests últims citen 0.34, 0.28, 0.24 i 0.14 per grava, sorra grollera, mitjana i fina, respectivament, tot per a un coeficient d'uniformitat de 3.

La ubicació més probable de formació d'un fenomen d'erosió regressiva és a la fonamentació, on els sòls cohesius superposats formen un sostre estable. La tubificació en el terraplè és probable que produeixi inestabilitat de talussos de forma local al peu de la presa, ja que qualsevol tub de reduïdes dimensions dins el terraplè tendria a col·lapsar. Una possible excepció es troba a l'entorn del nivell freàtic, on les terres que estan per damunt d'un tub creat a partir d'un fenomen d'erosió regressiva poden ser sostingudes gràcies a les forces de succió en el suprajacent sòl parcialment saturat.

7.5.3 Factors influents en el fenomen de l'erosió del sòl

Els principals factors que afecten al fenomen d'erosió són: a) la erosionabilitat del sòl; b) la velocitat de l'aigua dins la massa de sòl; c) la geometria de l'estructura del sòl, és a dir, la forma i mida dels seus grans.

L'*erosionabilitat* es pot definir com la relació entre la velocitat de l'aigua fluïnt pel sòl i el corresponent rati d'erosió experimentat pel sòl. Aquesta definició d'erosionabilitat presenta alguns problemes perquè la velocitat de l'aigua és una quantitat vectorial que varia a tot arreu en el flux i és teòricament zero a la interfície sòl-aigua. És preferible quantificar l'acció de l'aigua al sòl per mitjà de l'esforç tallant aplicat per l'aigua al sòl a la interfície aigua-sòl. Així, l'erosionabilitat d'un sòl pot ser definida per la relació entre el rati d'erosió \dot{Z} i l'esforç tallant τ a la interfície entre el sòl i l'aigua (Briaud, 2008), $\dot{Z} = f(\tau)$.

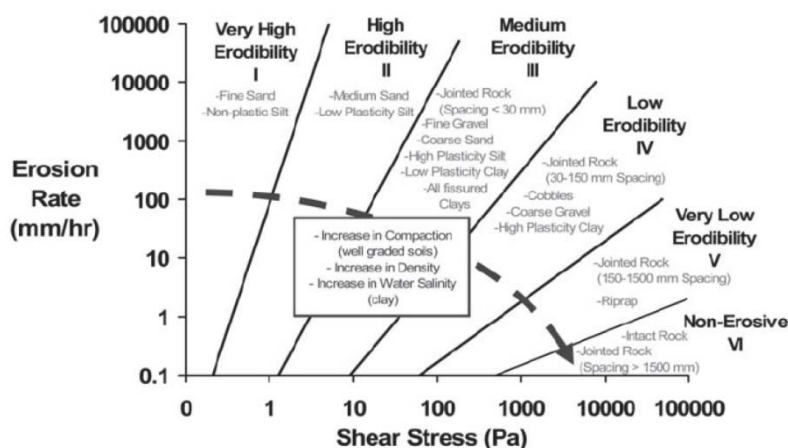


Figura 26. Categories d'erosió proposades per sòls i roques basades en l'esforç tallant (Font: Briaud, 2008)

La Figura 26 mostra les categories d'erosió proposades per sòls i roques basades en l'esforç tallant (Briaud, 2008). D'acord amb la figura, sembla que la mida de gra controla l'erosió dels sòls de gra groller i la plasticitat sembla tenir una influència significativa en l'erosió dels sòls de gra fi. Addicionalment, algunes de les propietats més importants que influeixen en l'erosionabilitat dels sòls s'enumeren a la següent Taula 2.

Contingut d'aigua	Rati de dispersió
Pes específic	Capacitat d'intercanvi catiònic
Índex de plasticitat: - Argiles IP>15 = alta resistència a l'arrossegament - Argiles 6<IP<15 = mitjana resistència - Argiles IP<6 = baixa resistència	Rati d'absorció de sodi
Resistència en condicions no drenades	pH del sòl (àcid o bàsic)
Índex de porus (porositat)	Temperatura del sòl
Capacitat d'inflament	Temperatura de l'aigua
La mida mitjana de gra	Salinitat de l'aigua
Tant per cent passant pel tamís #200	pH de l'aigua
Contingut en minerals d'argila	

Taula 2. Propietats dels sòls influents en l'erosionabilitat (Font: Briaud, 2008)

D'altra banda, la velocitat del flux d'aigua a través de la massa de sòl depèn de la conductivitat hidràulica del sòl i del gradient hidràulic. Segons diverses proves experimentals, el flux d'aigua a través de sòls fins es considera que és laminar (les partícules d'aigua es mouen paral·lelament les

unes amb les altres), i aquest flux segueix la llei de Darcy, donant la següent expressió:

$$V = k \cdot i = k \cdot \frac{(h_1 - h_2)}{L} = k \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

on V = velocitat del flux d'aigua, k = conductivitat hidràulica (10^{-1} a 10^{-9} cm/s), i = gradient hidràulic, h_1 = altura piezomètrica a l'entrada, h_2 = altura piezomètrica a la sortida i L = longitud de la trajectòria del flux.

És important destacar l'existència d'un valor del gradient hidràulic que fa que les tensions efectives entre les partícules del sòl es converteixin en zero, de tal manera que les forces de fricció resistents contra l'erosió esdevenen nul·les. El menor gradient hidràulic que anul·la aquestes tensions s'anomena *crític* i el seu valor normalment oscil·la entre $1 \pm 0,20$.

Alguns altres factors que influeixen en l'erosió interna dels sòls són: a) el grau de compactació de les capes de sòl en l'estructura de terres; b) la homogeneïtat i control de qualitat en la construcció de les estructures de terres; per exemple, si la permeabilitat de les capes del sòl varia d'unes a altres, podria existir una major concentració de filtracions en aquestes capes de major permeabilitat; c) el tipus de mesures preventives en el costat d'aigua avall d'una estructura de terres, com ara filtres graduats dissenyats per a prevenir el desplaçament de les partícules fines; d) el control de la compactació al llarg de la instal·lació de conductes/canonades; al llarg d'aquestes instal·lacions, s'han produït moltes fuites i fenòmens de tubificació que estan recollides en la literatura tècnica (Flores-Berrones *et al.* 2011); e) existència de ruptura hidràulica en certes zones d'una estructura de terres, on la pressió d'aigua en els porus es fa més gran que les tensions principals menors (Peck, 1976); f) tal com ja s'ha esmentat, els sòls d'alta plasticitat, com per exemple argiles d'alta plasticitat, són menys vulnerables a l'erosió que els sòls no cohesius.

7.5.4 Procediments i recomanacions pràctiques per a la prevenció de danys deguts a l'erosió del sòl

Per a prevenir l'erosió del sòl a través del terraplè es poden adoptar diverses mesures. S'haurien de considerar les següents recomanacions:

- a) Obtindre la millor selecció dels materials de construcció disponibles.
- b) Controlar la homogeneïtat dels materials durant el procés de construcció.
- c) Utilitzar zones de transició entre els materials grollers i fins.
- d) Utilitzar filtres i drens dissenyats adequadament a totes les zones del terraplè exposades a les accions perjudicials de l'aigua, ja sigui en la fonamentació o al voltant del nucli impermeable.

La millor manera de prevenir la fissuració del nucli d'una presa de materials solts heterogènia és mitjançant la disposició de filtres. Un filtre és un material intermedi entre un sol fi i un altre més gruixut, amb una diferència de granulometria tal que els grans del primer no poden migrar a través del segon arrossegats pel flux d'aigua. Els filtres afavoreixen l'autosegellat de les fissures a l'impedir la seva progressió per pèrdua de material. El pes i la plasticitat del sòl protegit fa que amb el temps es tanqui l'obertura.

Els filtres dissenyats adequadament haurien de satisfer les següents característiques:

- El filtre hauria d'interceptar l'aigua que flueix a través d'esquerdes o obertures i hauria de bloquejar el moviment de les partícules erosionades del sòl. Per tant, ha d'existir una relació entre la mida de les partícules del sòl protegit i les obertures del filtre.
- Els filtres han de tenir suficient permeabilitat per evitar elevats gradients de filtracions o pressions d'aigua; aquesta condició hidràulica significa que el filtre ha d'actuar com un bon cos drenant.
- Els grans o partícules del filtre no han de tenir cap mena de migració a causa de l'acció del flux d'aigua, és a dir, no es pot acceptar la possibilitat que succeeixi l'anomenada sufusió o tubificació en sols dispersius (*suffusion* en anglès). Això vol dir que els filtres han de ser dissenyats per mantenir la seva estructura interna sempre estable.

En relació al disseny del drenatge, Cedergren (1989) recomana que "els enginyers dissenyadors haurien d'analitzar cada component d'un sistema de drenatge (filtres, capes permeables, col·lectors, punts de sortida, etc.) per assegurar que tot el sistema tingui la capacitat necessària i funcioni com es pretén".

Per a la prevenció de l'erosió del sòl o del fenomen de tubificació/*pipi*ng a través de la fonamentació permeable d'una estructura de terres, s'haurien de prendre les següents mesures:

- Continuació de la zona impermeable del terraplè fins a un estrat de sòl impermeable o substrat rocós (Figura 27a). S'entén per substrat rocós la roca consolidada existent sota les zones recobertes per materials alterats o disgregats.
- Injeccions en el terreny (en anglès *grout curtain*, que consisteix en una barrera que protegeix la fonamentació d'una presa enfront les filtracions) o disposició de palplanxes, que són unes seccions estructurals d'acer amb un sistema d'enclavament vertical que crea una paret contínua (anomenat en llenguatge anglosaxó *steel sheet piling*) o d'una pantalla de formigó (*concrete cutoff wall*), per sota del nucli impermeable del dic de terres (Figura 27b).
- Disposició d'una làmina impermeable aigua amunt, per tal de disminuir el gradient hidràulic a la sortida (Figura 27c).
- Combinació de les recomanacions a), b) i c) referides precedentment. Sherard *et al.* (1967) presenten diversos exemples de preses de terres que s'han construït arreu del món, en els quals és possible observar solucions de disseny alternatives.

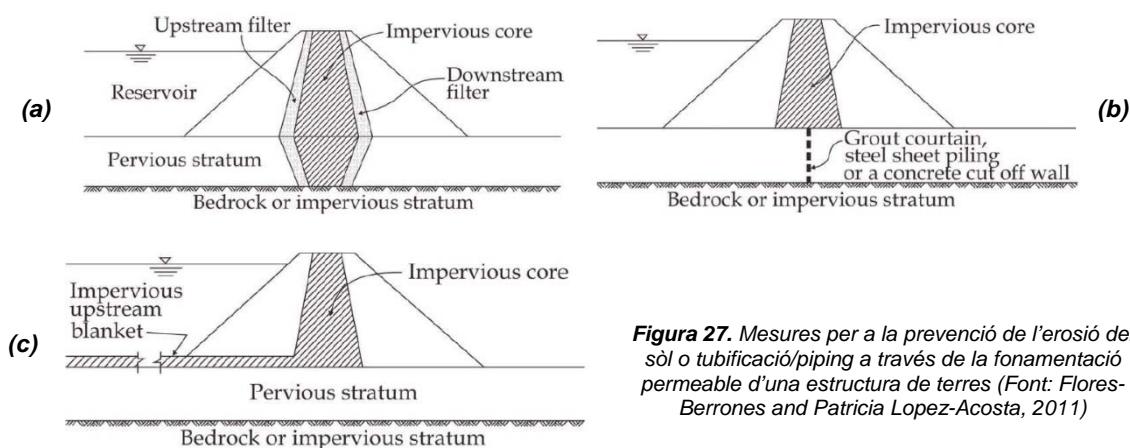


Figura 27. Mesures per a la prevenció de l'erosió del sòl o tubificació/*pipi*ng a través de la fonamentació permeable d'una estructura de terres (Font: Flores-Berrones and Patricia Lopez-Acosta, 2011)

7.6 Caracterització geomètrica i evolució temporal de l'esvoranc de "el Pantà Gran"

Previ a l'anàlisi hidràulica del trencament que es desenvolupa a partir del següent apartat, l'objectiu d'aquest és sintetitzar l'evolució geomètrica al llarg del temps de l'esvoranc, a partir de la informació present a l'Apartat núm. 6 titulat *Reconstrucció de l'episodi de trencament*, que es va produir al dic de contenció de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs el dia 20 d'abril del 2012, provocat per un fenomen d'erosió interna en la fonamentació del dic de terres. Caracteritzar geomètricament la bretxa que es va formar i saber com aquesta va evolucionar en el temps es podria qualificar com a imprescindible per al desenvolupament del present estudi, donat que és la base per a reproduir hidràulicament el trencament real que es va produir, i obtenir finalment l'hidrograma de sortida (cabal de sortida en funció del temps) causat pel trencament del terraplè de la bassa.

Es recorda que la secció del trencament segueix, en la seva base, el contacte entre el terraplenat i el terreny natural. A la següent taula es fa un resum del procés de desenvolupament de l'esvoranc, tant des del punt de vista temporal com geomètric:

Instant temporal	Descripció
Un dia abans del trencament (19/04/2012)	Fuita a la part baixa del talús exterior del terraplè del costat oest de la bassa, que anava en augment a mesura que passaven les hores.
5:42h (20/04/2012)	Detecció d'un remolí/vòrtex a la làmina d'aigua en l'interior de la bassa, situat aproximadament al peu del talús interior del terraplè del costat oest, en la seva secció de més alçada.
Entre les 9:28h i les 9:32h (20/04/2012)	Sortida de l'aigua de la bassa a través d'un orifici situat probablement just sota la làmina d'aigua en el talús interior. Important erosió interna del material argilós. Trencament de la zona situada al voltant del camí de coronació de la bassa, tant de manera superficial com interna/estructural.
Entre les 9:32h i les 9:39h (20/04/2012)	Va cedir i es va mobilitzar aigua avall gran part del material del dic de contenció, en excepció d'una part del talús exterior, a través del qual sortia l'aigua per un túnel de forma semicircular d'uns 5 metres de diàmetre. El cabal punta de sortida es va produir, molt probablement, en aquests moments.
10:54h (20/04/2012)	Continuava sortint aigua, però considerablement menys de la que sortia a les 9:39h, i el nivell de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa ja era bastant baix (es fa la hipòtesi que el nivell de la làmina d'aigua en aquest instant de temps a l'interior de la bassa es trobava a la cota 218,5 m.s.n.m.). Sembla ser que la geometria de l'esvoranc no havia canviat respecte de la situació present a les 9:39h, tot i que probablement s'havia erosionat material del fons del dic de terres.
Instant temporal indeterminat (20/04/2012)	Final del procés de sortida d'aigua de l'interior del vas de la bassa degut al trencament del dic de contenció de la bassa de reg. La forma final del trencament era idèntica a la que ja hi havia a les 10:54h i segurament molt semblant a la de les 9:39h.

Taula 3. Síntesi del procés de desenvolupament de l'esvoranc al terraplè de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs
(Font: elaboració pròpia)

Un aspecte important és la determinació geomètrica en el seu estat final del túnel de secció semicircular format aigua avall de la bretxa, a la zona del talús exterior de la bassa. Conèixer les seves dimensions és clau per a la modelització hidràulica del trencament real. En aquest sentit,

doncs, s'estableix que el túnel té uns 5 metres de diàmetre, valor que s'ha conegut gràcies a la informació proporcionada pel Sr. Jordi Charles i Companys, gerent de l'Ajuntament d'Alcarràs, i que s'ha contrastat i corroborat a partir d'una ortofotografia concreta PNOA25 (25 cm de resolució o dimensions de píxel) de l'àmbit objecte d'estudi, obtinguda del *Instituto Geográfico Nacional* (es fa notar que les sigles PNOA signifiquen *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea*).

Gràcies a les ortofotografies aèries digitals de resolució 25 cm de l'any 2012 (PNOA25), s'ha pogut observar, a través de fotografia aèria, tot l'àmbit d'estudi en alta resolució, en un instant temporal poc després de succeir el trencament. Tant és així que es pot veure amb bastanta precisió l'esvoranc que es va produir al terraplè de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs, així com la zona d'acumulació de sediments aigua avall del dic de contenció de la bassa. L'estat final i les principals dimensions que caracteritzen l'esvoranc es poden observar a la figura següent:

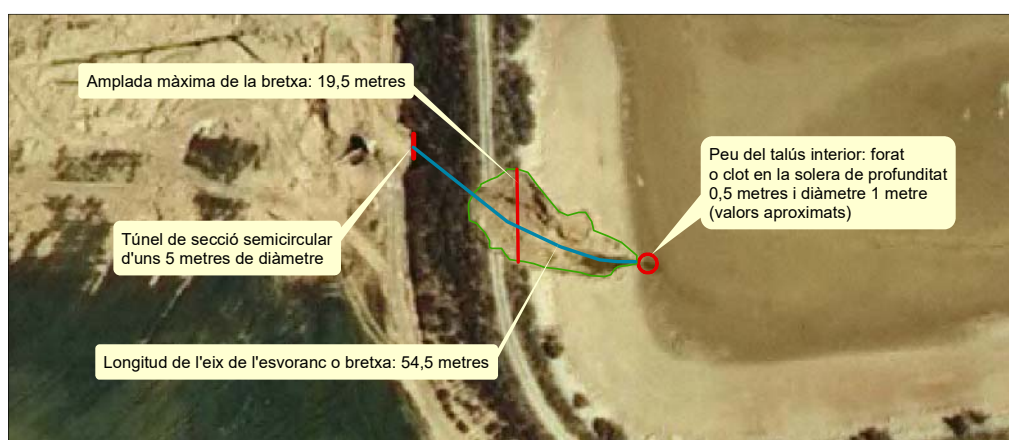


Figura 28. Detall de la zona del terraplè oest on es va produir l'esvoranc (Font: elaboració pròpia)

Finalment, es mostra la secció transversal del terraplè al llarg de l'eix de l'esvoranc, amb la forma i dimensions finals del trencament i d'altres característiques rellevants.

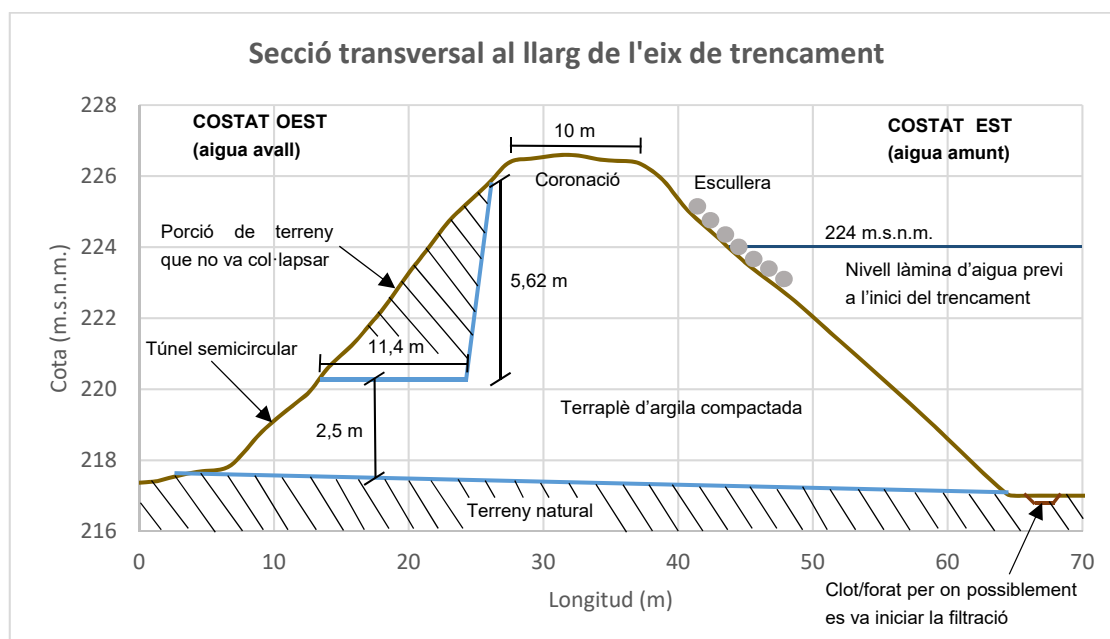


Figura 29. Geometria i dimensions de l'estat final de l'esvoranc, segons el sentit longitudinal del trencament (Font: elaboració pròpia)

8 Anàlisi hidràulica

8.1 Introducció. Metodologia

L'Annex núm. 4: *Anàlisi hidràulica* té com a principal objectiu exposar d'una manera detallada la metodologia seguida en el desenvolupament de l'estudi hidràulic del trencament del terraplè de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs i mostrar i analitzar els resultats obtinguts de les diferents modelitzacions realitzades, és a dir, la simulació del cas de trencament real així com el cas de trencament hipotètic recollit a la "*Guía Técnica de Clasificación de presas en función del riesgo potencial*".

L'objectiu principal no és altre que poder contrastar finalment els supòsits teòrics que s'empren en els estudis hidràulics de trencament de grans basses amb la realitat succeïda, donat que es disposen de dades del trencament real.

La metodologia que s'ha seguit per a l'estudi hidràulic del trencament de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs, tant pel cas de reproducció del mecanisme real de trencament com pel cas hipotètic de trencament trapezoïdal segons estableix la Guia Tècnica, ha estat el següent:

1. Visita de reconeixement de camp de les proximitats de la bassa i de les zones situades aigua avall potencialment inundables en cas de trencament. Es va posar especial èmfasi en la visita i el reconeixement de les obres de drenatge i ponts que intercepten la llera de la riera dels Reguers, així com les particularitats de les estructures/obres de pas situades als terraplens de les tres infraestructures que creuen la riera (AVE, Autovia A-2 i N-IIa).
2. Selecció del model numèric a partir de les característiques de l'àmbit de terreny a modelitzar. Degut a la component bidimensional del flux resultant del trencament de la bassa, a causa de la inexistència de lleres estrictament definides, s'ha optat per l'elecció del model hidràulic 2D Iber (v.2.3.2) desenvolupat, entre d'altres organismes, per la Universitat Politècnica de Catalunya.
3. Caracterització geomètrica del terreny de les potencials zones de circulació del flux provocat en cas de trencament. S'ha realitzat un Model Digital del Terreny (MDT), incloent el relleu del vas de la bassa de reg, a partir de les dades del vol LIDAR 1:1.000 que va realitzar l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) en la zona d'estudi durant els anys 2008 i 2009.
4. Zonificació dels usos del sòl, a partir de la informació publicada a l'any 2009 dels usos del sòl del CREA (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals), que té una resolució (píxel) de 0,25 metres. A partir d'aquesta zonificació s'han establert els valors dels coeficients de rugositat de Manning associats a cada ús del sòl.
5. Introducció al model hidràulic de les diferents edificacions presents a la zona d'estudi, així com de les estructures (ponts, obres de drenatge, obres de pas, passos inferiors, etc.), a més de l'estudi i possible tractament dins al model de possibles obstruccions i fenòmens locals que podrien afectar a la propagació de l'ona de trencament.

6. Establiment de les condicions inicials (principalment nivell d'aigua a l'interior de la bassa), les condicions de contorn i els paràmetres de càlcul del model hidràulic bidimensional.
7. Establiment de les hipòtesis de trencament de la bassa, és a dir, s'ha definit, en el cas del trencament contemplat a la Guia Tècnica: la forma i les dimensions màximes de l'esvoranc, així com la seva evolució durant el temps de trencament. Pel que fa al trencament real, aquest es modelitza mitjançant la introducció d'un element font (introducció d'un hidrograma) aigua avall del talús exterior del terraplè de la bassa, que ja contempla de forma implícita les característiques del trencament real.
8. Establiment del límit de l'estudi aigua avall, tenint en compte l'efecte de l'ona de trencament sobre el cabal a la llera del riu Segre.
9. Propagació de l'ona de trencament, utilitzant el model hidràulic bidimensional Iber. Una vegada finalitzats els càlculs i verificats i validats els diversos models, es procedeix a l'extracció dels resultats i al seu tractament mitjançant eines SIG.

8.2 Selecció del model numèric. El model hidràulic 2D Iber

Per tal d'abordar amb la màxima precisió la inundació que es pot assolir en cas d'una avinguda procedent del trencament del terraplè de la bassa de reg "el Pantà Gran" i alhora ser el màxim de realista, s'ha optat per realitzar modelitzacions bidimensionals (2D) amb el model Iber (que és una eina de simulació numèrica del flux d'aigua en làmina lliure en rius), **atenent a les característiques del curs fluvial de la riera dels Reguers i de la orografia dels terrenys per on circula la seva llera (àmplies planes d'inundació)**. La modelització bidimensional reproduceix amb més exactitud els calats i les velocitats del flux desbordat respecte a una modelització unidimensional, perquè té en compte el desacoblament del flux desbordat respecte el flux de la llera i determina els efectes de l'ocupació sobre dels terrenys en la laminació de la punta dels hidrogrames.

El model Iber 2D utilitza una metodologia de càlcul amb la qual a partir de les lleis físiques de conservació que governen el flux d'un fluid en general (conservació de la massa, conservació de la quantitat de moviment i equacions constitutives), particularitzat a un flux incompressible i isotròpic, com és l'aigua, s'obtenen les equacions de Navier-Stokes per al moviment instantani i d'aquestes es dedueixen, considerant variables mesurades en el temps, les equacions de Reynolds.

D'aquestes, integrant en la profunditat per eliminar la dimensió vertical, s'obtenen les equacions de Saint Venant bidimensionals, vàlides quan el flux que es vol representar té també aquest caràcter bidimensional, amb velocitats verticals petites, pendent del fons de la llera suaus, i en general les dimensions horitzontals predominen sobre la vertical.

Utilitzant notació vectorial, podem escriure les equacions de Saint Venant en dues dimensions en forma conservativa com:

$$\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_y}{\partial y} = \sum_k \mathbf{G}_k \quad (1.1)$$

on el vector de variables conservades \mathbf{w} i el vector dels termes de flux $\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_y$ venen donats per:

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix} \quad \mathbf{F}_x = \begin{pmatrix} q_x \\ \frac{q_x^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{pmatrix} \quad \mathbf{F}_y = \begin{pmatrix} q_y \\ \frac{q_x q_y}{h} \\ \frac{q_y^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

i els termes \mathbf{G}_k , representen els termes font inclosos en les equacions hidrodinàmiques.

L'equació 1.1 consta de tres termes. El primer terme representa la variació temporal local de les variables hidràuliques: massa i quantitat de moviment; el segon terme representa la variació espacial dels fluxos de les mencionades quantitats; i el tercer terme (terme independent) representa l'increment o la pèrdua de massa i quantitat de moviment per unitat de temps en un volum diferencial que es mou amb el fluid. En qualsevol cas la variació de massa ha de ser nul·la, pel que la primera component del vector de variables independent és zero.

La contribució exterior a la quantitat de moviment, amb les hipòtesis realitzades, té dues raons: la variació de l'energia potencial (reflexa el pendent de fons) i les forces de fricció amb el contorn (reflexa la pendent motriu).

En el mòdul hidrodinàmic es resolen les equacions de conservació de la massa i del moment en les dues direccions horitzontals:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} &= M_s \\ \frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} &= -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{2 \partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \\ \frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} &= -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{2 \partial y} - 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \end{aligned}$$

on h és el calat, U_x, U_y són les velocitats horitzontals mitjanades en profunditat, g és l'acceleració de la gravetat, Z_s és l'elevació de la làmina lliure, τ_s és la fricció en la superfície lliure deguda al fregament produït pel vent, τ_b és la fricció deguda al fregament del fons, ρ és la densitat de l'aigua, Ω és la velocitat angular de rotació de la terra, λ és la latitud del punt considerat, $\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$ són les tensions tangencials efectives horitzontals, i M_s, M_x, M_y són respectivament els termes font/detracció de massa i de moment, mitjançant els quals es realitza la modelització de precipitació, infiltració i detracció.

8.3 Dades de partença

8.3.1 *Model Digital del Terreny*

Per a poder realitzar l'estudi hidràulic es disposa de diversa informació cartogràfica i/o topogràfica de diferent detall. A partir de la fusió de tota aquesta informació, s'elabora un Model Digital del Terreny (MDT) per tal de realitzar el procés d'entrada i sortida de resultats en l'entorn SIG.

Aquesta documentació és la següent:

- Planta topogràfica general de la bassa de reg "el Pantà Gran", a través de la qual ha estat possible el modelat de la batimetria del vas de la bassa.
- Model Digital del Terreny de l'àmbit objecte d'estudi amb una densitat de punts d'entre 0,53 i 0,66 punts/m² (pas de malla inferior a 2x2 m²), creat a partir de les dades LIDAR disponibles de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) corresponents al projecte LIDARCAT (amb data de vol l'any 2009).

Finalment, tota aquesta informació topogràfica es combina de tal manera que s'obté un **Model Digital del Terreny de gran precisió (cel·les de mida 1x1 m²)**, la geometria del qual permetrà reproduir amb la màxima exactitud el comportament hidràulic del tram d'estudi.

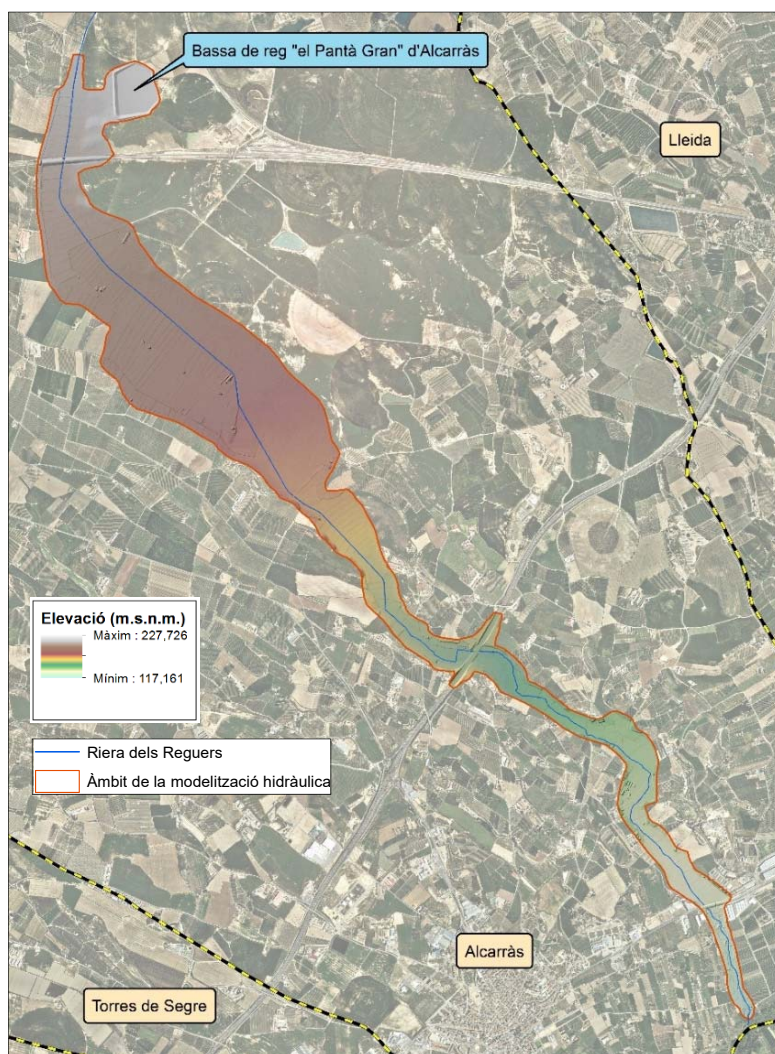


Figura 30. Vista aèria del Model Digital del Terreny i de l'àmbit de la modelització hidràulica (Font: elaboració pròpia)

8.3.2 Distribució dels coeficients de rugositat de Manning

Pel que fa a la rugositat assignada a les diferents modelitzacions, en el present estudi s'estima el coeficient de rugositat de Manning utilitzant la informació base de la coberta dels usos del sòl del *Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya* (MCSC), informació en format vectorial estructurat (polígons), 4a edició (2009), que és una cartografia temàtica d'alta resolució dels principals tipus de cobertes del sòl de Catalunya. Partint d'aquesta informació georeferenciada en format vectorial sobre els usos del sòl a tot Catalunya, s'ha establert la corresponent distribució dels coeficients de rugositat en funció del tipus de superfície, de manera que el seu valor representi el més fidelment possible les característiques rugoses del terreny. Així doncs, se sap que el valor del coeficient és més alt quanta més rugositat presenta la superfície de contacte de la corrent d'aigua i, contràriament, disminueix a mesura que la superfície és més llisa i té menys obstacles que dificulten el pas de l'aigua.

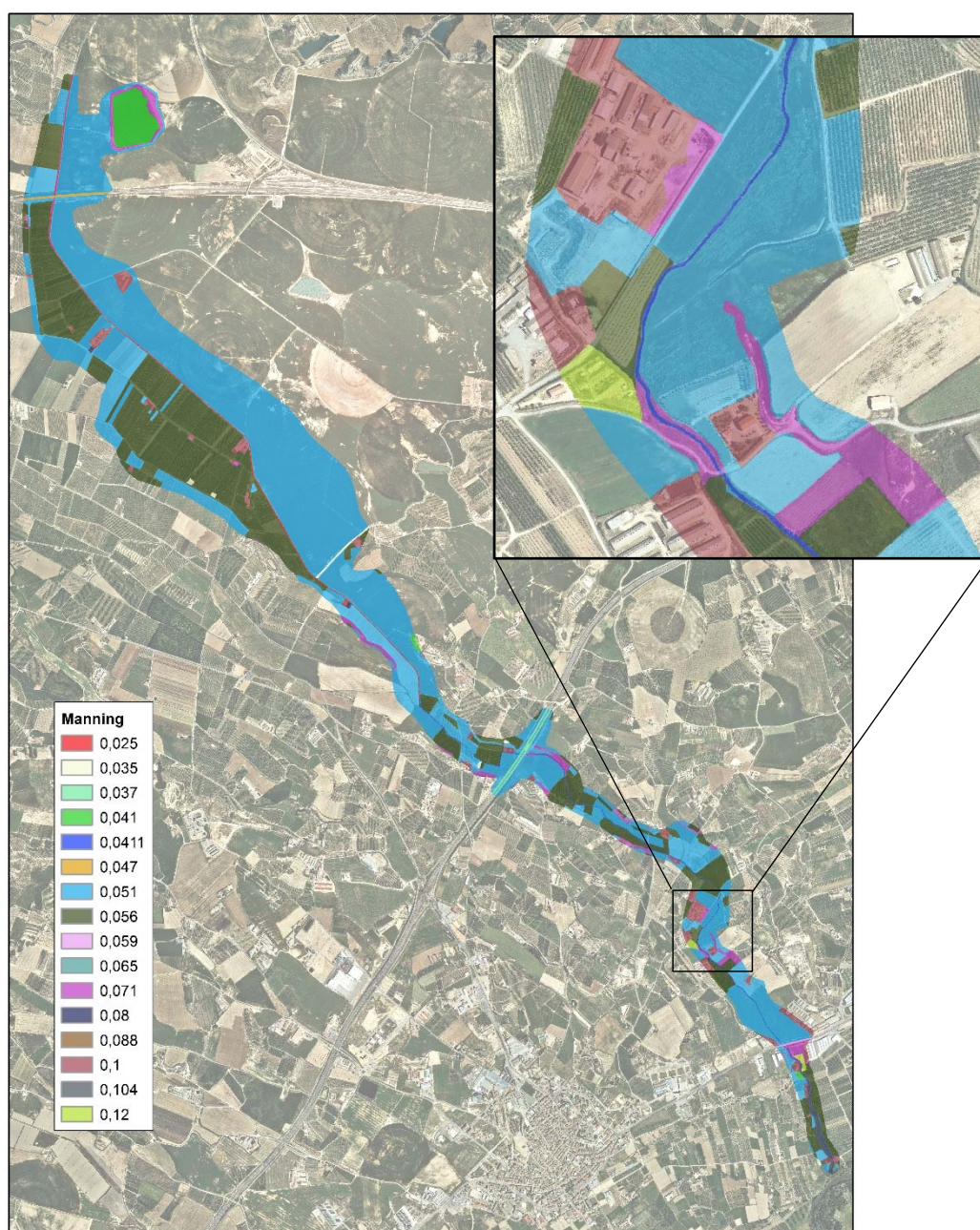


Figura 31. Distribució espacial dels coeficients de rugositat de Manning en l'àmbit objecte d'estudi (Font: elaboració pròpia)

8.3.3 Inventari i modelització de les infraestructures que interfereixen amb l'espai fluvial

Un element clau i que cal tractar amb molta cura per a la correcta simulació hidrodinàmica i per a l'obtenció de resultats realistes en el model Iber és la incorporació d'estructures especials com ara ponts i obres de drenatge (culverts, en nomenclatura anglesa). Aquestes estructures normalment no estan incloses en el Model Digital del Terreny (MDT) que s'utilitza com a base per a la generació de la malla de càlcul. La raó és que en moltes ocasions aquestes estructures tenen una mida inferior a la malla, però també perquè els formats comuns de fitxers MDT, d'estructura GRID, no permeten incloure els detalls d'aquest tipus d'estructures. No obstant això, el model Iber incorpora diverses eines que permeten la consideració de tota mena d'estructures en els models hidràulics, ja sigui mitjançant la introducció de **ponts**, d'**obres de drenatge** (culverts) o de **cobertes** (assimilable als taulells dels ponts).

En l'àmbit objecte d'estudi hi ha presents nombroses obres de fàbrica, ponts, obres de pas i obres de drenatge que, en cas de trencament, trobaria l'aigua durant el seu curs fins arribar a la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre. Així doncs, per al desenvolupament d'aquest estudi i per a realitzar una correcta simulació hidrodinàmica, durant la visita de camp es van prendre mesures de les dimensions de les estructures presents, per tal d'introduir-les al model hidràulic, i tenir així en compte l'obstrucció que representen aquests elements al pas de l'aigua.

Al llarg de l'apartat 4.3 de l'Annex núm. 4: *Anàlisi hidràulica* es detallen les dimensions i característiques de totes les estructures presents en l'àmbit objecte d'estudi i que interfereixen amb l'espai fluvial de la riera dels Reguers. Així mateix, s'especifica la metodologia utilitzada per a la correcta modelització de totes elles. També es detalla el tractament i l'edició que s'ha hagut de realitzar al MDT a les zones dels terraplens de les tres grans infraestructures que creuen la riera dels Reguers, que són: la LAV Madrid-Barcelona, l'Autovia A-2 i la ctra. N-II.

Habitualment, la presència d'infraestructures construïdes en terraplè, ponts o viaductes en l'àmbit d'estudi complica el model hidràulic en el sentit que cal un tractament específic del MDT d'aquestes zones previ a la creació del model en el programari Iber. Es podria dir que és imprescindible editar el MDT per a eliminar les obstruccions que en la realitat no existeixen i que, en cas de no eliminar, impedirien el pas de l'aigua. Per a tenir-ne una idea, quan s'estan enregistrant dades de cotes altimètriques durant un vol LIDAR, el sensor sempre capta les superfícies que es troben per sobre i a la seva vista i, fent referència al cas dels ponts, les cotes altimètriques dels punts del MDT que defineixen un pont corresponen al seu taulell i no el que queda per sota. Així doncs, en el terraplè de la LAV Madrid-Barcelona i en el de la carretera N-II s'ha corregit el MDT per a permetre el pas de l'aigua i evitar la presència d'obstruccions irrealistes sorgides arran del processament en el software SIG dels punts LIDAR.

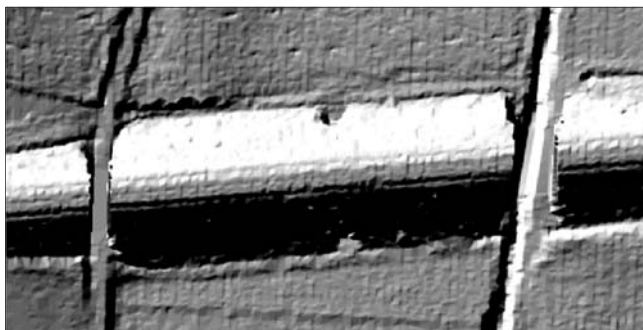


Figura 32. Resultat de l'edició del MDT a la zona del terraplè de les vies de la LAV (Font: elaboració pròpia)

En resum, en aquest estudi s'han modelitzat 13 obres de drenatge (de secció rectangular o circular) i cinc cobertes, que simulen la presència dels taulells dels ponts.

8.3.4 Condicions i paràmetres dels models

8.3.4.1 Condicions inicials

Per a reproduir l'esdeveniment real s'ha imposat la condició inicial de calat nul a tot el domini. No s'imposa una condició inicial de nivell d'aigua a l'interior de la bassa perquè la sortida d'aigua de la bassa degut al trencament es simula mitjançant l'addició d'un hidrograma de trencament en un punt situat a la zona de trencament del talús exterior del terraplè de la bassa de reg.

Per a la reproducció de l'escenari H1 segons normativa, s'ha establert la condició inicial de trencament sense avinguda i bassa en el seu N.M.N. d'explotació (cota 223,9 m.s.n.m.). A la resta de superfícies del model s'ha imposat la condició inicial de calat nul.

8.3.4.2 Condicions de contorn

Tant pel cas del trencament real com pel cas del trencament hipotètic segons l'escenari H1 de la normativa, s'han establert dues condicions d'entrada, que són:

1. Pel cas del trencament real s'introdueix un hidrograma de trencament a la zona del talús exterior de la bassa, a la zona on es va produir el trencament, obtingut a partir dels models hidràulics simplificats ideats a partir d'una formulació hidràulica que combina, en funció del nivell d'aigua a l'interior de la bassa, el cabal desguassat per un orifici i la presència d'una secció en règim crític.

En canvi, pel cas del trencament segons l'escenari H1 de la normativa, l'hidrograma de trencament de la bassa s'ha calculat utilitzant les capacitats del model hidràulic bidimensional Iber, que permet la simulació del trencament de preses i basses, a partir de l'assignació d'una condició inicial de nivell d'aigua al seu interior.

2. Una entrada de cabal constant ($0,2 \text{ m}^3/\text{s}$) al llarg de tota la simulació a la llera de la riera dels Reguers.

Com a condició de sortida aigua avall del model, s'ha assignat únicament flux crític a la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre.

8.3.4.3 Paràmetres de càlcul

Pel cas del trencament hipotètic segons l'escenari H1 de la normativa, s'ha establert un període de simulació superior a 5 hores (19.000 segons). Les dades s'han enregistrat amb una freqüència de 60 segons, amb el que s'han obtingut prop de 317 imatges seqüencials de l'avinguda.

Pel cas del trencament real, s'ha establert un període de simulació superior a 11 hores (40.080 segons). Les dades s'han enregistrat amb una freqüència de 60 segons, amb el que s'han obtingut 668 imatges seqüencials de l'evolució temporal de l'avinguda.

8.4 Reproducció de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica

8.4.1 Escenaris de trencament

La "Guia Tècnica per a l'elaboració de plans d'emergència de basses" i la "Guia Tècnica de Classificació de preses en funció del seu risc potencial" estableix tres situacions o escenaris a estudiar que són "Trencament sense avinguda (H1)", "Trencament en situació d'avinguda (H2)" i "Trencament de comportes (A1)", les característiques de les quals són les següents:

- H1. - Trencament de la presa, sense coincidència amb cap avinguda (trencament sense avinguda i amb l'embassament en el seu Nivell Màxim Normal d'explotació (NMN).
- H2. - Trencament de la presa coincident amb l'avinguda màxima considerada (trencament en situació d'avinguda i amb el nivell de l'embassament a coronació). (Situació d'avinguda per a basses: es considera que està entrant el màxim cabal d'aportació per l'obra d'abocament o d'entrada, coincident amb les màximes precipitacions esperades).
- A1. - Avinguda màxima considerada, suposada el no trencament de la presa (només avinguda i desguassant en les condicions de projecte). Embassament en el seu Nivell Màxim Normal d'explotació (N.M.N.) i en règim normal d'explotació.

Per norma general en l'estudi-proposta de classificació de basses, l'estudi de l'escenari de trencament en sec o sense avinguda (H1) és vàlid i suficient, donat que la majoria de les basses no tenen conca aportadora i no estan ubicades en Domini Públic Hidràulic (DPH).

En el cas de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs, i seguint les prescripcions del document "Criteris de revisió d'estudis-propostes de classificació de preses i basses en funció del risc", per a la realització d'aquest estudi, la modelització de **l'escenari de trencament en sec o sense avinguda (H1) és vàlid i suficient**. Aquest fet es pot justificar a partir de que "el Pantà Gran" és una bassa sense conca aportadora i, per tant, no està ubicada en DPH. Per aquest motiu, no és necessari estudiar l'escenari de trencament amb avinguda.

8.4.2 Bretxa de trencament a analitzar

Primerament s'ha analitzat el perímetre de la bassa, identificant les zones en desmunt i en terraplè. Es descarta el trencament per la zona en desmunt i s'analitzen els possibles punts de trencament en les zones de terraplè. Si bé els seus costats nord i est estan construïts majoritàriament en desmunt i/o aprofitant el terreny natural, els seus costats sud i est es troben construïts en terraplè de terra argilosa compactada, amb talús interior de pendent 1:2,5 recobert amb escullera i talús exterior amb pendent 1:1,5 sense recobriment.

Així doncs, tot el dic perimetral oest i gran part del sud està construït en terraplè, de manera que la bassa podria trencar-se per alguna d'aquestes zones. **Donat que el trencament real del dic de contenció de la bassa es va produir pel terraplè oest**, a la zona on aquest disposa de major altura en comparació amb el terreny natural exterior, **s'ha optat pel trencament en aquesta mateixa zona**.

L'altura de la bassa (h) a la zona on el terraplè disposa de major altura respecte del terreny natural és igual a 9,6 metres (de la cota 217,1 m fins a la 226,7 m), essent la cota de finalització de la bretxa de trencament la cota 217,1 m.s.n.m.

D'acord amb la "Guia Tècnica de Classificació de preses en funció del seu risc potencial", el tipus de trencament i la forma i evolució de la bretxa depenen del tipus de presa, essent la hipòtesis més comú que en les preses de materials solts el trencament és progressiu en el temps i amb evolució des de formes geomètriques inicials fins la pràctica totalitat de la presa. Així doncs, per a simular el fenomen de formació i progressió de la bretxa, la Guia Tècnica es basa en el model de la progressió lineal, en el que es contemplen diversos paràmetres geomètrics i temporals, recomanant-se que en principi s'adopti el següent tipus de trencament i paràmetres en el cas de les preses de materials solts:

Forma de trencament

La Guia Tècnica estableix que la forma és trapezial i amb les següents característiques:

- Profunditat de la bretxa fins al contacte amb la llera o el terreny natural en el peu del talús.
- La formulació per al càlcul de l'amplada de la bretxa en dics de terres és la següent:

$$b(m) = 20 \cdot [V(hm^3) \cdot h(m)]^{\frac{1}{4}}$$

- Talussos: 1H:1V.

Temps de trencament

Mentre que en les preses de volta i de gravetat el temps de trencament es considera instantani, en les preses de materials solts la Guia Tècnica proporciona una fórmula que, igual que en la forma del trencament, depèn de l'alçada de càlcul (h) i del volum de càlcul (V). La fórmula en concret és la següent:

$$T(hores) = 4,8 \cdot \frac{V^{0,5}(hm^3)}{h(m)}$$

Per tant, en el cas concret del dic de contenció de la bassa de reg "el Pantà Gran", considerant que es produeix el trencament seguint l'eix de la secció d'altura de la bassa $h = 9,6$ m, i que se segueixen les premisses de la hipòtesi H1 quant a nivell d'aigua dins la bassa, els paràmetres i característiques que defineixen el trencament són els següents:

Paràmetre	Valor
Alçada de càlcul (profunditat de la bretxa)	$h = 226,7 - 217,1 = 9,6$ m
Volum de càlcul (nivell d'aigua al Nivell Màxim Normal, que està a la cota 223,9 m.s.n.m.)	$V = 430.125$ m ³ = 0,430125 hm ³
Forma de la bretxa	Trapezial amb talussos 1H:1V
Amplada mig de la bretxa	$b = 20 \cdot [0,430125 \cdot 9,6]^{\frac{1}{4}} = 28,51$ m
Temps de trencament	$T(h) = 4,8 \cdot \frac{0,430125^{0,5}}{9,6} = 0,3279$ h = 19,68 min = 1.180,8 segons

Taula 4. Paràmetres i característiques del trencament del dic de terres segons la Hipòtesi H1 (Font: elaboració pròpia)

8.4.3 Anàlisi hidràulica de la propagació de l'ona de trencament

8.4.3.1 Hidrograma de sortida degut al trencament

En el present estudi es proposen i desenvolupen dues maneres diferents d'obtenir l'hidrograma de sortida resultant de la modelització de l'escenari de trencament H1 contemplat a la Guia Tècnica del terraplè de la bassa de reg "el Pantà Gran". El primer mètode consisteix en extreure directament els resultats del model bidimensional Iber, ja que és un model hidràulic que permet simular la formació de bretxes d'una forma molt adequada i realista. La segona manera d'obtenir l'hidrograma es basa en la creació d'un model propi en un full de càlcul, a partir de la programació de diverses rutines de càlcul. Una vegada vistos els dos mètodes, es realitza una comparativa dels resultats obtinguts, a fi i efecte d'identificar el grau de similitud entre els resultats i la bondat dels mètodes.

8.4.3.1.1 Hidrograma de sortida segons resultats del model bidimensional Iber

En el model hidràulic bidimensional Iber existeix l'opció de simular la formació de la bretxa quan es produeix el trencament d'una presa, a partir de la introducció de certs paràmetres requerits. En definitiva, el que fa el model és modificar el terreny (crear l'esvoranc) al llarg del temps segons la forma, les dimensions i el temps especificat al llarg de l'eix on es defineix el trencament.

La formació de la bretxa en el model Iber es pot definir d'acord amb els criteris de la "Guia Tècnica Espanyola" o seguint els criteris de formació "trapezoïdal" de la bretxa. En aquest estudi s'ha elegit el criteri de formació "trapezoïdal". En el cas elegit és necessari, doncs, especificar 8 paràmetres que defineixen l'esvoranc. En el cas de la bassa de reg "el Pantà Gran" s'han utilitzat els següents paràmetres per a definir l'esvoranc:

Criteri de formació	Trapezoïdal
Coordenades 1r punt eix	290.299,4574 4.612.061,8767 217,0000
Coordenades 2n punt eix	290.246,6253 4.612.057,8127 217,0833
Cota de la cresta	226,7 m.s.n.m.
Cota del fons de la bretxa	217,1 m.s.n.m.
Amplada superior de la bretxa	38,11 m
Amplada del fons de la bretxa	18,91 m
Instant d'inici de la bretxa	0,0 s
Temps de trencament	1.180,8 s

Taula 5. Paràmetres que defineixen l'esvoranc produït al dic de contenció segons la Hipòtesi H1 (Font: elaboració pròpia)

L'hidrograma resultant, just aigua avall de la bretxa formada, inicia l'abocament als 7 minuts des de l'inici del desenvolupament de l'esvoranc i té un cabal punta de 420,75 m³/s, que es produeix als 20 minuts des de l'inici de la formació de la bretxa. La corba de l'hidrograma de trencament obtingut del model 2D Iber es pot observar més avall, a l'apartat 8.4.3.1.3., a on es comparen els dos hidrogrames obtinguts mitjançant metodologies diverses.

8.4.3.1.2 Hidrograma de sortida obtingut a partir d'un model hidràulic propi

El model hidràulic desenvolupat en un full de càlcul es basa en veure que la bretxa, durant el procés de sortida d'aigua, actua com un sobreeixidor en làmina lliure, la capacitat de desguàs de la qual ve condicionada per la secció crítica. Gràcies a això, i coneixent la geometria de la bretxa, la cota de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa i la cota base de l'esvoranc a cada instant de temps, es pot establir una relació entre totes aquestes variables i conèixer el cabal de sortida per la secció de l'esvoranc a cada instant temporal. En definitiva, cal dividir el temps de càlcul del procés en diversos increments finits i calcular la variació de totes i cadascuna de les variables que intervenen en els càlculs en cada increment de temps.

Hi ha dues variables que estan estretament relacionades, que són la cota de la làmina d'aigua (z_w) i el volum (V) a l'interior de la bassa. Es recorda que es disposa de la corba característica de la bassa, que és la que representa a l'eix de les abscisses la cota (m.s.n.m.) i a l'eix d'ordenades el volum acumulat (m^3). A través d'una funció d'interpolació desenvolupada per l'Agustí Pere Figueras Romero (ABM) es pot conèixer per a qualsevol cota de la làmina d'aigua el seu volum associat, i al revés.

La metodologia de càlcul utilitzada per a reproduir el fenomen de buidat degut al trencament de la bassa de reg es basa en el següent procés iteratiu:

1. Donada la cota de la làmina d'aigua en un instant temporal a l'interior de la bassa es pot conèixer el volum d'aigua associat.
2. Es calcula el cabal de sortida per la bretxa a partir de la coneixença del nivell d'aigua a l'interior de la bassa, així com les dimensions, la forma (trapezoïdal amb talussos 1H:1V) i la cota inferior de la bretxa en aquell instant temporal.

Pel que fa al cabal de sortida pel sobreeixidor o vessador de secció trapezoïdal, aquest es calcula tenint en compte les següents premisses:

- a) Es considera que el sobreeixidor és de paret gruixuda, donat que es compleix la relació $e/h > 0,67$ (e és el gruix del sobreeixidor i h la càrrega hidràulica).
- b) S'utilitzen les equacions d'un sobreeixidor de paret gruixuda de secció rectangular i de secció triangular.

$$Q_{secc. \text{ trapezoïdal}} = Q_{secc. \text{ rectangular}} + Q_{secc. \text{ triangular}}$$

En una secció rectangular, el cabal de sortida és funció del coeficient de desguàs del sobreeixidor (C_d), de l'amplada del fons de la bretxa (B), de la cota de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa (z_w) i de la cota del fons de la bretxa (z_b). Així doncs, es té que:

$$Q_{secc. \text{ rectangular}} = \begin{cases} 0 & \text{si } z_w \leq z_b \\ C_d \cdot B \cdot (z_w - z_b)^{1,5} & \text{si } z_w > z_b \end{cases}$$

En una secció triangular, el cabal de sortida és funció del coeficient de desguàs del sobreeixidor (C_d), de la tangent de l'angle existent entre un pla horitzontal i el talús de la bretxa trapezoïdal ($\tan \beta$), de la cota de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa (z_w) i de la cota del fons de la bretxa (z_b). Finalment:

$$Q_{secc. triangular} = \begin{cases} 0 & \text{si } z_w \leq z_b \\ C_d \cdot \tan \beta \cdot (z_w - z_b)^{2,5} & \text{si } z_w > z_b \end{cases}$$

- c) Es considera un valor estàndard pel coeficient de desguàs del sobreeixidor (1,4).
 - d) Els talussos de la secció trapezoïdal del trencament tenen un pendent 1H:1V.
3. En cada increment de temps (5 segons) es calcula el volum desguassat degut a la sortida d'aigua per la bretxa. Aquest es calcula mitjançant l'expressió:

$$\Delta V_i = \frac{Q_i + Q_{i-1}}{2} \cdot (t_i - t_{i-1})$$

- 4. Per tant, coneixent aquesta variació (en aquest cas, disminució) de volum en cada interval de temps, aquest es pot restar del volum que hi havia a l'interior de la bassa just a l'instant anterior t_{i-1} .
- 5. Sabent el nou volum causat pel progressiu desguàs d'aigua cap a l'exterior de la bassa es pot conèixer novament la cota del nivell d'aigua associada a partir de la funció d'interpolació de la corba característica. Aquest cop, però, s'ha d'utilitzar una funció d'interpolació inversa, ja que el procés és exactament l'invers que el realitzat al pas (1).
- 6. El procés iteratiu (1) a (6) es realitza tantes vegades com nombre d'increments de temps es tinguin (en aquest cas, 800).

L'hidrograma resultant, just aigua avall de la bretxa formada, inicia l'abocament als 6 minuts des de l'inici del desenvolupament de l'esvoranc i té un cabal punta de 455,72 m³/s, que es produeix als quasi 20 minuts des de l'inici de la formació de la bretxa. La corba de l'hidrograma de trencament obtingut a partir d'aquesta metodologia pròpia de clara fonamentació hidràulica es pot observar al següent apartat 8.4.3.1.3., a on es comparen els dos hidrogrames obtinguts mitjançant metodologies diverses.

8.4.3.1.3 Comparació dels hidrogrames de trencament

Una vegada obtingut l'hidrograma de trencament de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs seguint les hipòtesis del trencament H1 que especifica la normativa segons dues metodologies diverses, és moment de comparar-les i veure si els resultats són semblants o no.

Per a l'anàlisi i comparació convé tenir les dues corbes resultants en una mateixa gràfica, tal i com la que es mostra a la pàgina següent:

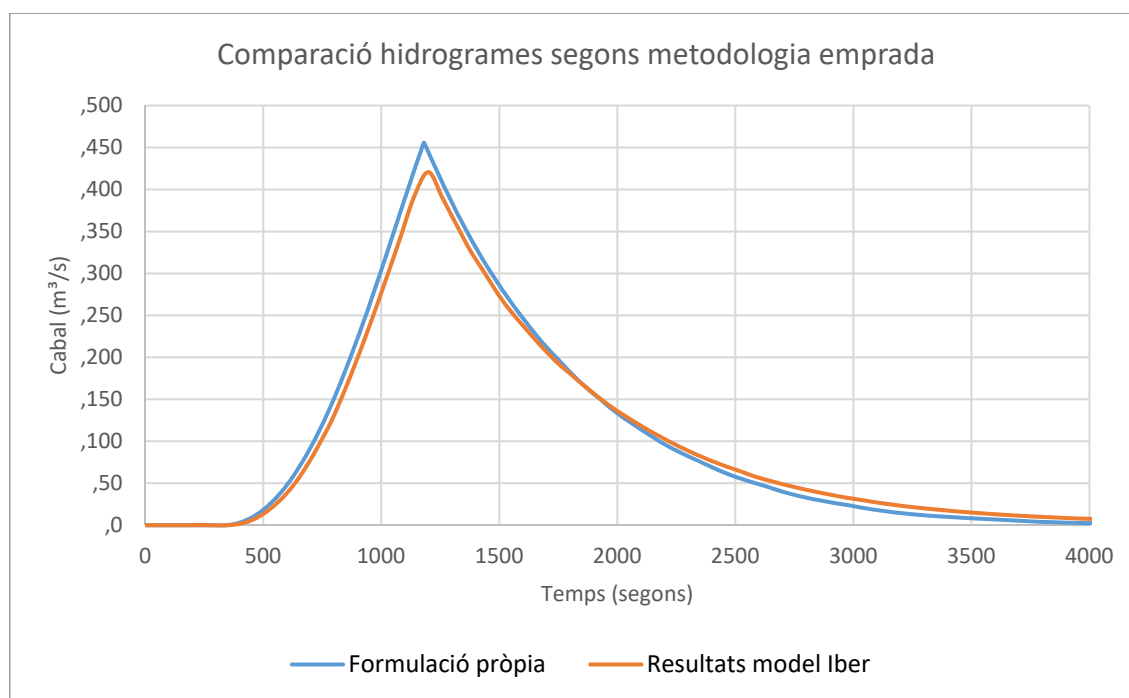


Figura 33. Comparació dels hidrogrames obtinguts segons el model hidràulic propi i el model Iber (Font: elaboració pròpia)

De l'observació de les corbes precedents es poden extreure les següents conclusions:

- Els dos hidrogrames són bastant similars i, per tant, confirma d'una banda la bondat i validesa dels resultats del model bidimensional Iber i, de l'altra, la bona adequació a la realitat del mètode hidràulic ideat de forma pròpia i el desenvolupament correcte de les formulacions proposades.
- L'hidrograma obtingut a partir del model hidràulic propi té un cabal punta més elevat, arribant a assolir els $455,72 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre que l'obtingut a partir del model Iber se situa als $420,75 \text{ m}^3/\text{s}$ (7,7% inferior).
- Malgrat aquesta susceptible diferència ($34,97 \text{ m}^3/\text{s}$) entre els valors absoluts dels cabals màxims, cal remarcar que els instants de temps en que es produeixen respecte a l'inici de la formació de la bretxa coincideixen bastant. En el cas de l'hidrograma obtingut a partir de la formulació pròpia, el màxim se situa als 1.180 segons respecte de l'inici, mentre que pel que fa a l'hidrograma obtingut del model Iber, el màxim es troba a 1.200 segons de l'inici.
- L'àrea entre la corba de l'hidrograma i l'eix de les abscisses representa el volum d'aigua desguassat de l'interior del vas de la bassa. A primera vista semblaria que sota la corba que representa l'hidrograma obtingut a partir de la formulació pròpia hi ha una superfície major. En efecte, s'assoleix el valor de $427.743,98 \text{ m}^3$, mentre que en el cas del model Iber el volum és de $421.115,24 \text{ m}^3$. Es recorda que el volum a N.M.N. (223,9 m.s.n.m.) de la bassa és de 430.125 m^3 . Aquesta lleugera diferència és deguda, en part, a que s'ha calculat el volum desguassat fins als 4.000 segons i després d'aquest instant encara va sortint una mica d'aigua. A part d'això, la cota final del trencament és la 217,1 m.s.n.m., que és el punt més baix del terreny natural al talús exterior, i el fons de la bassa es troba una mica per sota (217 m.s.n.m.). En resum, doncs, es pot concloure que el volum d'aigua desguassat en els dos casos estudiats s'aproxima bastant a la realitat.

8.4.3.2 Resultats. Mapa general de calats màxims

Tot seguit es mostra un mapa general del conjunt de l'àmbit d'estudi amb la superposició dels calats màxims obtinguts de la propagació d'aigua avall de la bassa de reg de l'ona de trencament resultant del cas hipotètic de trencament H1 (l'hidrogràma de trencament escollit per a la simulació amb el model 2D Iber ha estat el calculat pel propi model, que permet la simulació del trencament de basses, a partir de l'assignació d'una condició inicial de nivell d'aigua al seu interior).

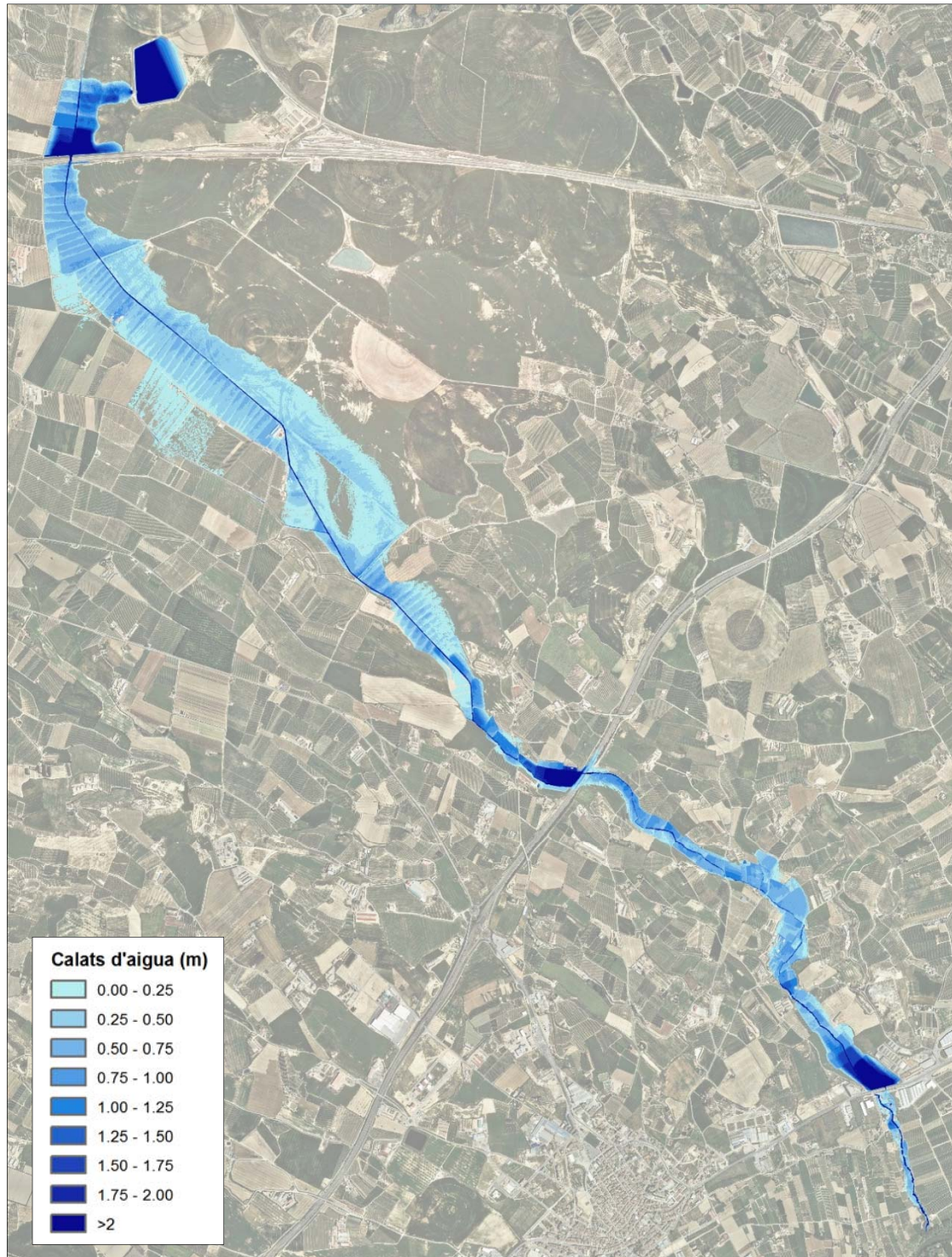


Figura 34. Mapa de calats màxims. Hipòtesis de trencament segons la Guia Tècnica (Font: elaboració pròpia)

8.4.4 Anàlisi de sensibilitat sobre la resolució en el Model Digital del Terreny

En tot estudi, i aquest referent a la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs no n'és una excepció, es treballa amb alguns factors sobre els que es té poder de decisió (variables controlables), i altres sobre els que només es poden realitzar estimacions (variables no controlables). Dins del grup de variables controlables s'hi pot incloure, per exemple, el Model Digital del Terreny (MDT) que s'utilitza com a base en el model hidràulic bidimensional Iber, ja que aquest pot tenir més o menys detall i precisió en funció de les dades i metodologia base a partir de les quals s'ha creat.

Precisament doncs, en l'apartat 5.4 de l'Annex núm. 4: *Anàlisi hidràulica* es realitza un anàlisi de sensibilitat exhaustiu d'una de les variables controlables típiques d'un model hidràulic, com és el Model Digital del Terreny (representa la variable cota del terreny en relació a un sistema de referència concret). Un anàlisi de sensibilitat no té altre objectiu que el d'avaluar l'impacte que les dades d'entrada o de les restriccions especificades a un model definit, tenen en el resultat final o en les variables de sortida del model (Turban, 2001). Així doncs, l'anàlisi de sensibilitat efectuada té l'objectiu d'identificar l'impacte que resulta en els resultats del problema original després de variar la **resolució espacial** que caracteritza el Model Digital del Terreny.

Naturalment, com més gran són les dimensions del píxel, pitjor serà la precisió dels resultats del model hidràulic. Sense cap mena de dubte es pot afirmar que disposar d'un Model Digital del Terreny precís i realista de la zona a estudiar és la base per a la realització d'una adequada i veraç simulació numèrica del flux d'aigua en l'àmbit d'estudi.

Com a regla general, es pot dir que la resolució espacial ha de ser inferior a la meitat de la mida de l'objecte més petit d'interès. Així doncs, i atenent a la densitat de punts LIDAR disponible en l'àmbit d'estudi, es considera oportú efectuar una anàlisi comparativa entre un Model Digital del Terreny de pas de malla $1 \times 1 \text{ m}^2$ i un altre de $1,4 \times 1,4 \text{ m}^2$ (malla amb les cel·les d'àrea el doble de grans que les de $1 \times 1 \text{ m}^2$).

L'anàlisi comparativa es concreta en un aspecte fonamental, que és **l'avaluació de la diferència entre els resultats obtinguts del model hidràulic bidimensional Iber, pel cas de trencament hipotètic H1 contemplat a la Guia Tècnica, a partir de la utilització de les dues bases altimètriques diverses ($1 \times 1 \text{ m}^2$ i $1,4 \times 1,4 \text{ m}^2$)**. S'ha extret la diferència de nivells d'aigua entre els dos casos i també s'ha realitzat una anàlisi de la diferència de velocitats. Aquest aspecte és, sens dubte, la base per a detectar el grau d'influència de la variable Model Digital del Terreny en els resultats del model hidràulic.

Globalment, els resultats de calats i nivells obtinguts a partir dels dos models creats amb diferent resolució espacial són bastant similars a tot arreu, **excepte a la zona de camps de conreu situada concretament just aigua amunt de la carretera N-II**, on els nivells són sensiblement diferents. Val a dir que, degut a les característiques d'aquesta zona i a les reduïdes seccions per on pot travessar l'aigua el terraplè de la carretera N-II (hi ha dos tubs soterrats de diàmetre 1,5 m cadascun, que permeten el pas dels cabal d'aigües baixes procedent de la riera dels Reguers, i també existeix un pas inferior pels vehicles, que té unes dimensions de 4 m d'amplada x 4,3 m d'alçada), aquesta queda embassada aigua amunt del terraplè. Aquest és un fet que també es va observar el dia 20 d'abril de 2012, dia en el que va succeir el trencament real de la bassa de reg "el Pantà Gran".

En efecte, a la zona situada just aigua amunt de la carretera N-II, el nivell de la làmina d'aigua, que és manté constant en una bona extensió aigua amunt del terraplè de la carretera N-II, és més elevat en el cas del model hidràulic en que s'ha utilitzat el Model Digital del Terreny de pas de malla 1,4x1,4 m². Concretament, el nivell de l'aigua en aquest supòsit és de 136,42 m.s.n.m., mentre que si es consideren els resultats obtinguts a partir del MDT de pas de malla 1x1 m², aquest valor es redueix fins als 136,25 m.s.n.m..



Figura 35. Ràster de nivells d'aigua pel cas del MDT 1x1 m² (esquerra) i MDT 1,4x1,4 m² (dreta) - Font: elaboració pròpia

A continuació es mostra el mapa de la diferència de nivells entre els dos casos estudiats en el mateix àmbit mostrat a les dues imatges anteriors:

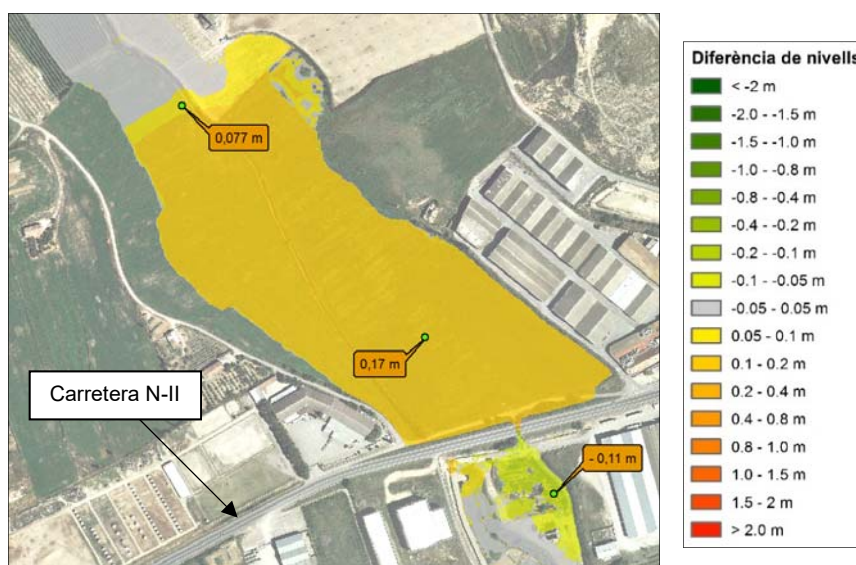


Figura 36. Ràster de la diferència de nivells entre els casos MDT 1x1 m² i MDT 1,4x1,4 m² (Font: elaboració pròpia)

Com es pot observar, el nivell de la làmina d'aigua és major en el cas del model en que s'ha utilitzat un pas de malla d'1,4x1,4 m² (concretament 17 cm major que el model de pas de malla 1x1 m²). Així mateix es pot observar la gran extensió de terreny on és constant la diferència de nivells de 17 cm, i com a partir d'una certa distància (uns 525 metres aproximadament) aigua amunt de la carretera N-II, ja no s'aprecia cap mena de diferència de nivells entre els dos models objectes d'estudi. Finalment, remarcar el fet que a la zona de l'antiga depuradora d'Alcarràs, àmbit situat immediatament aigua avall del pas inferior de la carretera N-II, es capgira la tònica dels resultats, i és que el model de pas de malla 1x1 m² dona majors nivells en aquesta zona (en el punt mostrat a la Figura 36 anterior es detecta una diferència d'11 cm).

Amb tot això, de l'anàlisi de sensibilitat efectuat sobre la resolució espacial en el Model Digital del Terreny, i emprat en la modelització hidràulica bidimensional amb l'Iber (s'han utilitzat dimensions de malla d' $1 \times 1 \text{ m}^2$ i $1,4 \times 1,4 \text{ m}^2$) es desprenen les següents conclusions i consideracions generals:

- Les dues bases altitudinals són de detall (alta densitat de punts) i precisió elevada. Ambdues s'han creat a partir dels punts LIDAR de Catalunya (projecte LIDARCAT, amb data de vol l'any 2009) amb una densitat de punts d'entre 0,53 i 0,66 punts/ m^2 . Aquesta cobertura de la base –disponibilitat de dades– és de tot Catalunya.
- De la comparativa efectuada d'aquestes dues bases es constata que, de mitjana, existeixen diferències altitudinals d'ordre centimètric, mentre que en termes màxims s'arriba fins a diferències altitudinals d'ordre mètric, amb una distribució d'aquestes últimes en diverses zones amb importants desnivells en el terreny (terraplens, edificis, lleres, etc.).
- Ambdues bases altitudinals representen els elements del terreny rellevants en la modelització hidràulica, inclosos els tres terraplens de les grans infraestructures lineals que passen per l'àmbit d'estudi (LAV Madrid-Barcelona, Autovia A-2 i carretera N-II). No obstant això, s'han detectat diferències significatives en l'obra de pas (pas inferior de vehicles) existent sota la carretera N-II, que provoquen una reducció de la capacitat de desguàs i causen un augment irreal del nivell de la làmina d'aigua en la zona just aigua amunt de la carretera N-II. De tot plegat s'ha conclòs que el MDT $1 \times 1 \text{ m}^2$ és el que representa amb més exactitud la situació actual del pas inferior, que té 4 metres d'amplada.

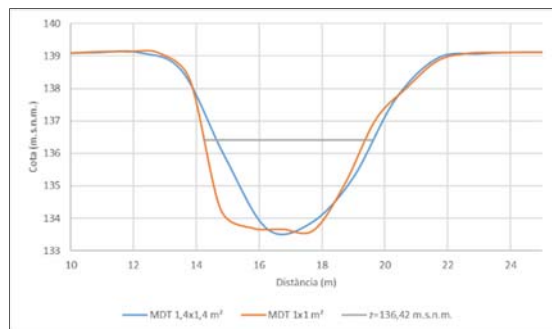


Figura 37. Seccions del pas inferior de la carretera N-II segons el MDT $1 \times 1 \text{ m}^2$ i $1,4 \times 1,4 \text{ m}^2$ (Font: elaboració pròpia)

- A les zones planeres la diferència altitudinal entre els dos Models Digitals del Terreny és pràcticament insignificant, mentre que a les zones amb forts desnivells o relleu abrupte és on s'aprecia major diferència. Aquesta particularitat fa que, com és natural, es detecti una major diferència en els resultats en terrenys accidentats, tal com succeeix a la llera de la riera dels Reguers, on existeixen diferències destacables pel que fa a les velocitats entre els dos models hidràulics.
- La malla d' $1,4 \times 1,4 \text{ m}^2$ seria idònia, en termes de memòria i emmagatzematge a l'ordinador, per a la seva incorporació en el model Iber. Malgrat aquest avantatge, cal estudiar quin dels dos Models Digitals del Terreny és millor utilitzar i quin aporta un major guany en termes cost-benefici. En el cas de disposar d'un ordinador potent per a realitzar els càlculs (com acostumen a ser els actuals), resulta viable implementar un Model Digital del Terreny d' $1 \times 1 \text{ m}^2$ en un àmbit de 5 km^2 (àrea del present estudi d'inundabilitat). A més, com s'ha vist, aquest MDT reproduïx amb molta més precisió les dimensions reals del pas inferior de la carretera N-II, cosa que fa decantar la balança cap a la seva utilització.
- De les característiques pròpies de cada base es constata que la precisió altitudinal del MDT $1 \times 1 \text{ m}^2$ és superior a la del MDT $1,4 \times 1,4 \text{ m}^2$. La distribució i magnitud de les diferències comporten, tal i com s'ha demostrat, a diferències locals significatives en els resultats del model d'inundabilitat. De tot l'exposat es conclou que la base més apropiada per a la seva incorporació al model d'inundabilitat desenvolupat en Iber seria l' $1 \times 1 \text{ m}^2$.

8.5 Reproducció de l'esdeveniment real

8.5.1 Introducció

El mètode que s'emptra pel càlcul de l'hidrograma real de sortida resultant del trencament del terraplè de la bassa de reg en base a l'esdeveniment succeït el dia 20 d'abril del 2012 al T.M. d'Alcarràs, es tracta d'un model hidràulic simplificat, ideat i creat de forma autònoma i expressament pel cas objecte d'estudi, que es basa en considerar la bassa com un gran dipòsit d'aigua, el qual conté un orifici de forma semicircular i de cota inferior constant, essent aquesta la de la interfície de contacte entre el terreny natural i el dic de terres, per on va sortint l'aigua de forma progressiva emmagatzemada al vas de la bassa, i que va augmentant de diàmetre amb el pas del temps fins a assolir un valor màxim de 5 metres (2,5 metres de radi) a partir del qual es manté estable.

Tal i com s'explica i es desenvolupa de forma detallada al llarg de l'apartat 6 de l'Annex núm. 4: *Anàlisi hidràulica* i es resumeix en els següents apartats, cal utilitzar dues formulacions diferents pel càlcul del cabal de sortida segons quin sigui el nivell d'aigua dins la bassa i el nivell o cota de la part superior del tub creat a partir del procés d'erosió interna. En concret, s'utilitza una formulació que permet calcular el cabal desguassat per un **orifici** quan el nivell d'aigua dins la bassa està per sobre de la cota de la part superior del tub, mentre que s'usa una formulació basada en la presència d'una **secció en règim crític** dins l'orifici (es produeix un calat crític, ja que es passa de règim lent dins la bassa a règim ràpid a dins el tub) quan el nivell de l'aigua a la bassa està per sota de la cota de la part superior del tub (en aquest cas, existeix un resguard entre el flux d'aigua que circula per l'orifici i la part superior del mateix, de tal manera que l'aigua flueix en làmina lliure).

8.5.2 Formulació del mètode desenvolupat

8.5.2.1 Nivell d'aigua dins la bassa per sobre de la part superior del tub

Tal i com s'ha explicat anteriorment, quan el nivell d'aigua dins la bassa està per sobre de la part superior del tub, s'utilitza la formulació del cabal desguassat a través d'un **orifici**. Un orifici és tota obertura realitzada o existent en un dipòsit, per sota del nivell superior del líquid, ja sigui en la paret lateral o en el fons.

Pel càlcul del cabal teòric desguassat es fa ús del teorema o principi de Torricelli, que és una aplicació del principi de Bernoulli i estudia el flux d'un líquid contingut en un recipient, a través d'un petit orifici, sota l'acció de la gravetat. Estableix el següent:

La velocitat d'un líquid en un recipient obert, per un orifici, és la que tindria un cos qualsevol, caient lliurement en el buit des del nivell del líquid fins el centre de gravetat de l'orifici.

Matemàticament:

$$v_t = \sqrt{2g \left(h + \frac{v_0^2}{2g} \right)} \quad (1)$$

on:

- v_t és la velocitat teòrica del líquid a la sortida de l'orifici.
- v_0 és la velocitat d'aproximació o inicial.
- h és la distància des de la superfície del líquid al centre de l'orifici.
- g és l'acceleració de la gravetat.

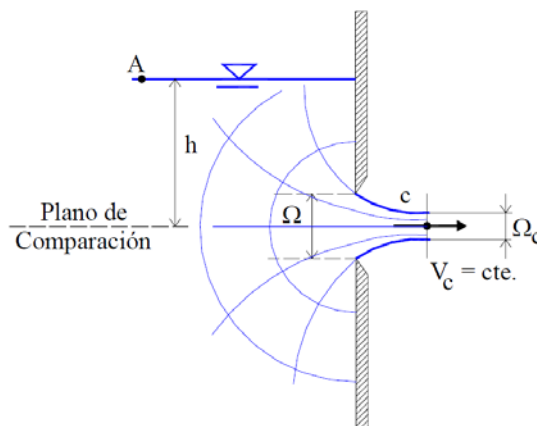


Figura 38. Teorema de Torricelli (Font: Luis Pérez Farras, 2005)

Si s'aplica Bernoulli entre els punts A i C (menyspreant les pèrdues), es té que:

$$h + \frac{p_a}{\gamma} + \frac{v_a^2}{2g} = 0 + \frac{p_c}{\gamma} + \frac{v_c^2}{2g}$$

Ara bé, com que v_a és nul·la, si s'aïlla v_c (que és la velocitat mitjana en la secció contraeta) s'obté:

$$v_c = \sqrt{2gh}$$

que és l'expressió idèntica a (1) considerant nul·la la velocitat d'aproximació o inicial (v_0).

Un anàlisi intuïtiu de les línies de corrent, com es pot apreciar a la Figura 38, permet interpretar la formació de la "secció contraeta Ω_c " a una certa distància de la paret de l'orifici, que és sobre la qual s'aplica Bernoulli.

D'aquesta forma, aplicant l'Equació de Continuitat i tenint en compte un coeficient experimental μ "de descàrrega de l'orifici", el qual consisteix en una funció complexa menor a la unitat (disminueix, en conseqüència, el valor teòric donat per l'expressió) en la que influeixen la viscositat del fluid, la tensió superficial, la formació de la secció contraeta, la variació real de la velocitat en la mateixa (es considera el valor mig en la deducció), la forma de la secció, etc.; s'obté l'expressió:

$$Q = \Omega_c \cdot V_c = \mu \cdot \Omega \cdot \sqrt{2gh}$$

En la que Ω és la secció real de l'orifici les dimensions de les quals, a diferència de la secció contraeta, són d'obtenció immediata.

En particular, en un orifici de paret gruixuda, **teòricament assimilable** al cas del tub format en el trencament del terraplè de la bassa de reg objecte d'estudi, la vena líquida reprèn el seu contacte amb la paret i conseqüentment l'efecte de "succió" o "Venturi" produït per la zona de menor pressió fa augmentar el coeficient μ . En aquest cas, el valor teòric del coeficient μ (anomenat comunament coeficient de descàrrega, C_d) és aproximadament 0,82; pel que l'expressió queda finalment com:

$$Q = C_d \cdot \Omega \cdot \sqrt{2gh} = 0,82 \cdot \Omega \cdot \sqrt{2gh}$$

8.5.2.2 Nivell d'aigua dins la bassa per sota de la part superior del tub

A partir de l'instant a partir del qual el nivell d'aigua dins la bassa queda per sota de la part superior del tub, ja no es compleix el citat Teorema de Torricelli i cal cercar una formulació hidràulica complementària que permeti igualment calcular el cabal desguassat per l'orifici.

La base de la formulació utilitzada consisteix en veure que existeix una secció en règim crític dins el tub on naturalment es produeix un calat crític, donat que aigua amunt, és a dir, dins la bassa, el règim hidràulic és lent o subcrític (velocitat de l'aigua pràcticament menyspreable), mentre que quan l'aigua surt pel tub o orifici el règim hidràulic és ràpid o supercrític. A la següent Figura 39 es pot observar una secció transversal que representa una part de l'interior de la bassa, així com el propi dic de terres on s'ha produït el trencament, amb el fenomen hidràulic descrit anteriorment.

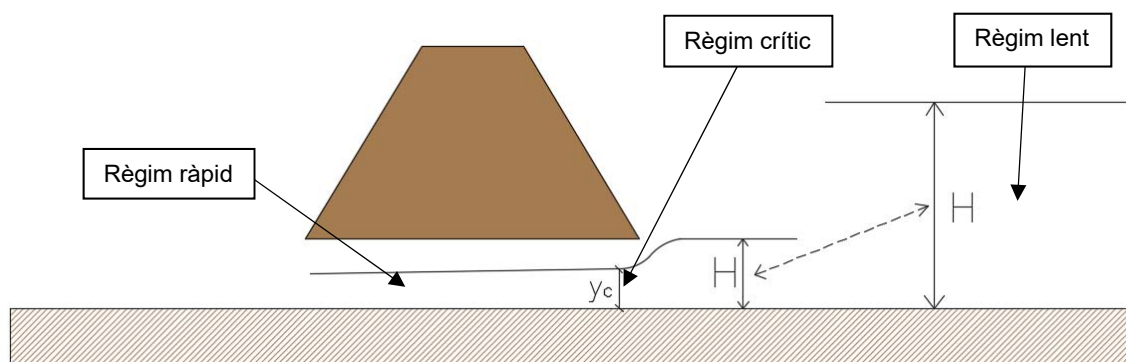


Figura 39. Perfil longitudinal de la làmina d'aigua al llarg de la secció de trencament i diferents règims hidràulics segons el tram (Font: elaboració pròpia)

A continuació es presenta la formulació hidràulica utilitzada pel càlcul del cabal desguassat en aquesta situació. En ella apareixen dos conceptes importants de la hidràulica, el conegut nombre de Froude (Fr) i l'energia específica, els quals es defineixen de forma detallada a l'Annex núm. 4.

Val a dir que, tot i que l'orifici que es va formar realment tenia una forma aproximadament semicircular, per a simplificar els càlculs i les fórmules se suposa que la secció dins el tub on es produeix el règim crític té forma **rectangular** (hipòtesi simplificadora).

Suposant que el calat d'aigua a la secció rectangular és y i l'amplada de la secció B , el nombre de Froude (Fr) per una secció rectangular es pot escriure de la següent forma (essent v la velocitat mitjana de la secció del canal (m/s), g l'acceleració de la gravetat (m/s^2) i Q el cabal d'aigua desguassat (m^3/s)):

$$Fr = \frac{Q}{By} \cdot \frac{1}{\sqrt{g \cdot \frac{By}{B}}} = \frac{Q}{By\sqrt{gy}} = \frac{v}{\sqrt{gy}}$$

Suposant règim crític a la secció objecte d'estudi, $Fr^2 = 1$, s'obté finalment:

$$v = \sqrt{gy}$$

Pel que fa a l'energia específica crítica en una secció rectangular, aquesta es pot escriure de la següent manera:

$$E_{0c} = y_c + \frac{g \cdot y_c}{2g} = y_c + \frac{y_c}{2} = \frac{3}{2}y_c$$

on s'ha utilitzat l'expressió general de l'energia específica $E_0 = y + \frac{v^2}{2g}$ i s'ha fet ús del règim hidràulic crític: $Fr = 1$ i, per tant, $v^2 = gy$.

D'altra banda, l'energia específica dins la bassa es redueix únicament al valor del calat d'aigua dins la bassa, ja que la velocitat de l'aigua és menyspreable. Amb tot això, i sabent que l'energia específica dins la bassa ha de ser igual a l'energia específica a la secció on es produeix el calat crític, s'obté finalment la següent relació:

$$H = 1,5 \cdot y_c \rightarrow y_c = 2/3 \cdot H$$

Aquesta última expressió és d'extrema importància, donat que permet conèixer el calat crític dins el tub per a qualsevol valor del nivell d'aigua dins la bassa.

Sabent que a la secció de règim crític de dins el tub es compleix l'expressió $v = \sqrt{gy}$, el càlcul del cabal desguassat per l'orifici en el cas de tenir el nivell de l'aigua dins la bassa per sota de la part superior del tub és directe, mitjançant la següent fórmula (A és l'àrea mullada dins la secció rectangular, que és funció del calat d'aigua a la secció):

$$\frac{Q}{A(y_c)} = \sqrt{gy_c} \Rightarrow Q = \sqrt{gy_c} \cdot A(y_c)$$

El càlcul del calat crític a la secció és immediat, a partir de la coneixença del nivell d'aigua H present dins la bassa. Quant a l'àrea mullada de la secció semicircular, es calcula a partir de l'ús de les fórmules d'un segment circular. En definitiva, l'àrea mullada que interessa de la secció semicircular és igual a l'àrea de tot el semicercle menys l'àrea del segment circular (funció del calat d'aigua a la secció), i es pot calcular a través de la següent expressió:

$$A(y_c) = \frac{\pi R^2}{2} - \frac{R^2}{2}(\theta - \sin \theta) = \frac{\pi R^2}{2} - \frac{R^2}{2}\left(2 \cdot \arccos \frac{y_c}{R} - \sin\left(2 \cdot \arccos \frac{y_c}{R}\right)\right)$$

essent R el radi del semicercle, θ l'angle central i y_c el calat crític.

8.5.3 Hipòtesis

8.5.3.1 Evolució temporal del nivell d'aigua a l'interior de la bassa

Gràcies a la disposició de diverses fotografies del mateix dia del trencament del terraplè de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs, resulta possible conèixer, de forma si més no aproximada, el nivell d'aigua dins la bassa en diversos instants de temps (gràcies a la coneixença de l'instant temporal de realització de les fotografies). Concretament, es disposa de fotografies realitzades a les 5:42h, 9:32h, 9:39h i 10:54h del dia del trencament que mostren el nivell d'aigua present a l'interior de la bassa. Com és obvi, el valor del nivell d'aigua que es dona no és ni molt menys exacte, ja que la seva determinació ve condicionada per diversos factors i errors inherents al mètode.

Així doncs, considerant les 5:41h com el temps d'inici de la simulació hidràulica, a la següent taula es mostra, per a cadascun dels quatre instants temporals citats més amunt, l'hipotètic nivell d'aigua present a l'interior de la bassa.

Temps de modelització	Nivell d'aigua (m.s.n.m.)
60 s (5:42h)	224
13.860 s (9:32h)	222
14.280 s (9:39h)	221,7
18.780 s (10:54h)	218,5

Taula 6. Relació de valors hipotètics "temps de modelització - nivell d'aigua a l'interior de la bassa" (Font: elaboració pròpia)

Conèixer, almenys de forma aproximada, l'evolució temporal del nivell d'aigua a l'interior de la bassa durant el dia del trencament és necessari per a poder elegir el patró més probable de creixement del tub durant el trencament real (al següent apartat es presenten els cinc patrons diferents de creixement del tub considerats en el present estudi). És condició necessària que el patró de creixement del tub comporti resultats que compleixin amb aquests nivells d'aigua a l'interior de la bassa; no obstant això, no és condició suficient, ja que caldrà veure que les afeccions aigua avall de la bassa i fins a la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre corresponguin amb les que van succeir realment al dia 20 d'abril del 2012. Aquesta informació és, per tant, útil per a descartar en primera instància diversos patrons de creixement del tub format.

8.5.3.2 Hipòtesis de creixement del tub

En el present estudi es consideren i s'estudien cinc patrons o hipòtesis diferents de creixement del tub format al terraplè de la bassa de reg "el Pantà Gran", degut al seu trencament.

Com ja s'ha comentat, el trencament de la bassa de reg "el Pantà Gran" va ser causat/iniciat per un procés d'erosió interna regressiva a la fonamentació del seu terraplè. Es desconex la durada d'aquest procés d'erosió interna (habitualment lent) que va acabar produint el col·lapse estructural del terraplè de la bassa; no obstant això, sí que es disposa d'informació del procés de trencament del dia 20 d'abril del 2012, de tal manera que és possible descriure'l temporalment.

Amb tot, s'estableix com a instant inicial del procés de tubificació les 5:42h del matí del dia 20 d'abril del 2012. El radi del tub, en aquest moment temporal, es considera igual a 5 cm (o 1 cm en el cas de la Hipòtesi 5). De les 5:42h a les 9:39h es desconeix el patró real de creixement de les dimensions del tub, de tal forma que és entre aquests instants de temps que es realitzen les cinc hipòtesis de creixement del tub. Al voltant de les 9:39h es produeix el col·lapse estructural de la part superior del dic de terres, mantenint-se tot i això a partir d'aquest instant el mateix diàmetre en el tub semicircular format al talús d'aigua avall del terraplè de la bassa de reg.

A la següent figura es mostren els cinc patrons estudiats d'augment de les dimensions del tub:

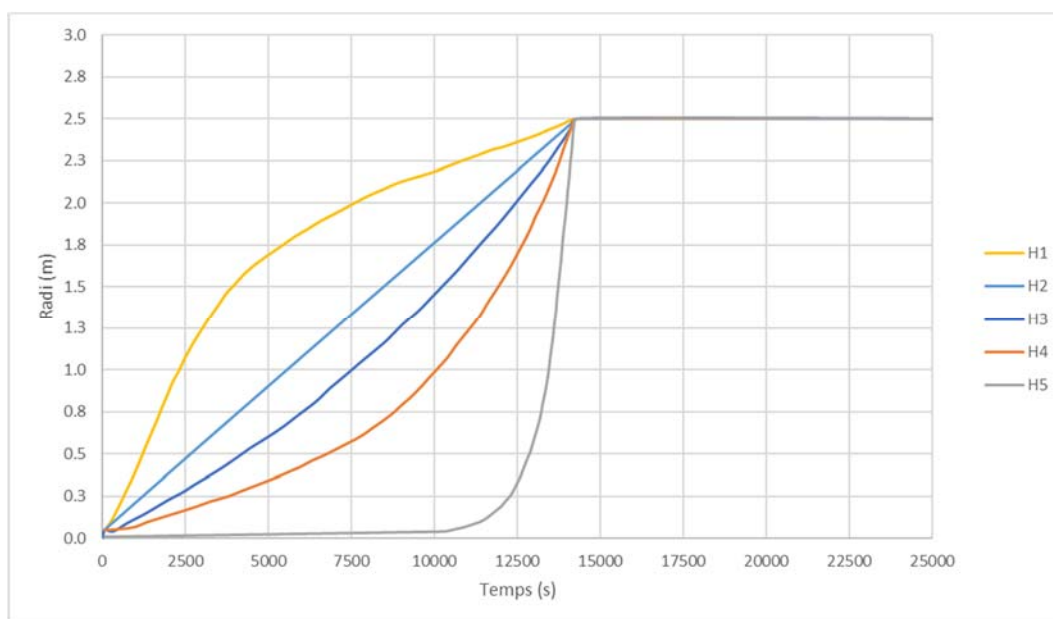


Figura 40. Hipòtesis considerades de creixement de les dimensions del tub (Font: elaboració pròpia)

A la següent taula s'especifiquen les característiques de cadascuna de les diferents hipòtesis de creixement establertes:

HIPÒTESI	Radi inicial (5:42h)	Forma funció creixent (5:42h - 9:39h)	Radi final (9:39h – indefinit)	Propietats
H1	5 cm	Còncava	2,5 m	Creixement ràpid de les dimensions del tub
H2	5 cm	Lineal	2,5 m	Augment lineal amb el pas del temps
H3	5 cm	Lleugerament convexa	2,5 m	Creixement lleugerament més lent que el cas lineal
H4	5 cm	Convexa	2,5 m	Augment pautat a l'inici i més marcat al voltant de les 9:39h
H5	1 cm	Marcadament convexa	2,5 m	Creixement extremadament lent durant les 3 primeres hores i sobtat al final

Taula 7. Propietats de les hipòtesis de creixement del tub (Font: elaboració pròpia)

8.5.4 Metodologia

L'objectiu principal d'aquest apartat és explicar sintèticament el procediment a partir del qual s'han obtingut els diferents resultats que es mostren de forma resumida al següent apartat de la memòria i de forma completa a l'apartat 6.5 de l'Annex núm. 4: *Anàlisi hidràulica*, a partir de l'elaboració pròpia en un full de càlcul d'un model hidràulic simplificat creat expressament per a la reproducció de l'esdeveniment real del dia 20 d'abril del 2012 al T.M. d'Alcarràs.

En aquest cas de trencament, la bretxa es comença a formar a la cota 217 m.s.n.m., que correspon a la base del dic de terres, en el seu contacte amb el terreny natural. L'esvoranc incrementa de dimensions verticalment sense afectar mai els fonaments del terraplè, de tal manera que en l'estat final, la part alta del tub format queda a la cota 219,5 m.s.n.m. (es recorda que el radi final és de 2,5 metres). Contràriament al cas del trencament hipotètic contemplat a la *Guia Tècnica*, en el qual l'aigua comença a sortir en el moment en que la bretxa assoleix la cota del nivell d'aigua a l'interior de la bassa, en aquest cas comença a sortir aigua cap a l'exterior des de bon principi, ja que el tub format queda a la part baixa del terraplè. Una cop comença a sortir aigua, el cabal de sortida augmenta progressivament, al mateix temps que l'esvoranc es va desenvolupant i es fa més gran, fins a assolir un màxim. Assolit el cabal màxim, però, el cabal d'aigua sortint anirà disminuint amb el temps fins a assolir un valor quasi negligible, que es produeix quan la quantitat d'aigua dins la bassa és pràcticament inexistent.

És vital entendre que la bretxa, durant el procés de sortida d'aigua, actua com un orifici mentre el nivell de la làmina lliure està per sobre de la part superior del tub format i quan el nivell de la làmina lliure queda per sota de la part superior del tub, és la secció crítica present dins el tub la que condiciona el flux d'aigua sortint, és a dir, la capacitat de desguàs està condicionada per la secció crítica. Gràcies a això, i coneixent la geometria de la bretxa, la cota de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa i la cota base de l'esvoranc a cada instant de temps, es pot establir una relació entre totes aquestes variables i conèixer el cabal de sortida per la secció de l'esvoranc a cada instant temporal (cal dividir el temps de càlcul del procés en diversos increments finits).

La metodologia de càlcul utilitzada per a reproduir el fenomen de buidat de la bassa de reg degut al trencament del seu terraplè es basa en el següent procés iteratiu, de base idèntica a l'utilitzat en el cas de la reproducció del trencament que contempla la *Guia Tècnica*, amb l'única diferència que ha resultat necessari calcular altres variables en cada instant de temps indispensables pel càlcul del cabal de sortida segons les fórmules explicitades a l'apartat 8.5.2. d'aquesta memòria:

1. Donada la cota de la làmina d'aigua en un instant temporal a l'interior de la bassa es pot conèixer el volum d'aigua associat (funció d'interpolació de la corba característica).
2. Es calcula el cabal de sortida per la bretxa a partir de la coneixença del nivell d'aigua a l'interior de la bassa, així com les dimensions i la cota inferior de la bretxa en aquell instant temporal. La fórmula utilitzada pel càlcul del cabal és funció, com s'ha explicat en l'apartat 8.5.2 de la present memòria, del nivell d'aigua present a l'interior de la bassa i de la cota de la part superior del tub format al dic de terres.
3. En cada increment de temps (60 segons) es calcula el volum desguassat degut a la sortida d'aigua per la bretxa. Aquest es calcula mitjançant l'expressió:

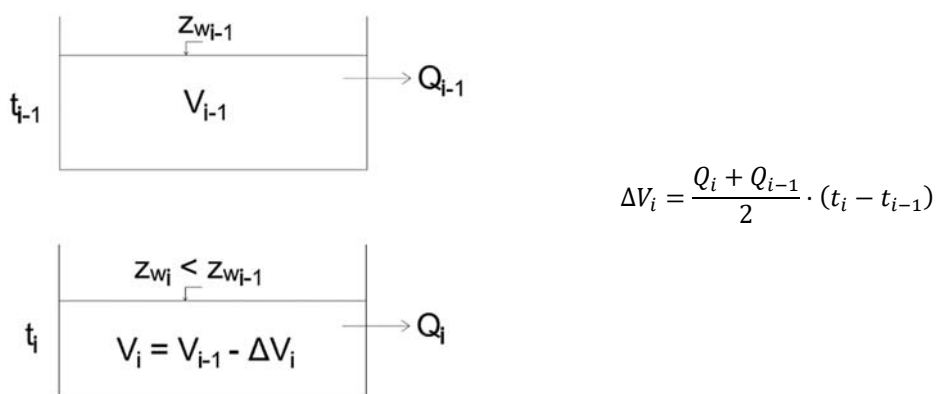


Figura 41. Representació esquemàtica del procés de buidatge de la bassa de reg degut al trencament (Font: elaboració pròpia)

4. Per tant, coneixent aquesta variació (en aquest cas, disminució) de volum en cada interval de temps, aquest es pot restar del volum que hi havia a l'interior de la bassa just a l'instant anterior t_{i-1} .
5. Sabent el nou volum causat pel progressiu desguàs d'aigua cap a l'exterior de la bassa es pot conèixer novament la cota del nivell d'aigua associada a partir de la funció d'interpolació de la corba característica. Aquest cop, però, s'ha d'utilitzar una funció d'interpolació inversa, ja que el procés és exactament l'invers que el realitzat al pas (1).
6. El procés iteratiu (1) a (6) es realitza tantes vegades com nombre d'increments de temps es tinguin (en aquest cas, 417).

Per al desenvolupament d'aquest mètode hidràulic simplificat és necessari disposar d'una sèrie de dades de partença, que són:

- a) La **volumetria de la bassa** (taula de valors cota-volum acumulat o corba característica).
- b) La **cota inicial de la làmina d'aigua** previ a l'inici del procés de trencament del terraplè.
- c) La relació **radi de la bretxa – temps**, funció de la hipòtesi de creixement del tub escollida.
- d) La **cota del fons de la bretxa** de secció semicircular, que és constant (cota 217 msnm).
- e) El **radi inicial** de la bretxa (5 cm per a les primeres quatre hipòtesis i 1 cm per a la darrera).
- f) El **radi final** de la bretxa (de valor 2,5 metres).
- g) La **forma de la bretxa** formada, que es considera semicircular.
- h) El **coeficient de descàrrega de l'orifici**. Es consideren dos casos d'estudi: el primer, igual a 0,82 (orifici de paret gruixuda); i el segon, per a corregir incongruències en els resultats, igual a 0,58.
- i) Establir el **pas de temps** per a la realització dels càlculs (60 segons).

Finalment, cal destacar que pel càlcul de l'alçada d'aigua que permet calcular el cabal desguassat per un orifici s'ha considerat la distància compresa entre la làmina lliure dins la bassa i el centroid del tub semicircular format, de tal manera que la distància entre el fons del tub semicircular i el centre de gravetat de la mateixa secció es calcula a partir de la fórmula $\frac{4r}{3\pi}$, essent r el radi del semicercle.

8.5.5 Resultats gràfics

A la present memòria es presenten els resultats gràfics obtinguts del model hidràulic simplificat del trencament considerant les dues hipòtesis de creixement de les dimensions del tub que s'adeqüen millor a la realitat succeïda, que són les Hipòtesis 2 i 3. Dins l'apartat 6.5 de l'Annex núm. 4: *Anàlisi hidràulica* es mostra la resta dels resultats obtinguts considerant les altres Hipòtesis (1, 4 i 5).

8.5.5.1 Hipòtesi 2: Funció de creixement lineal

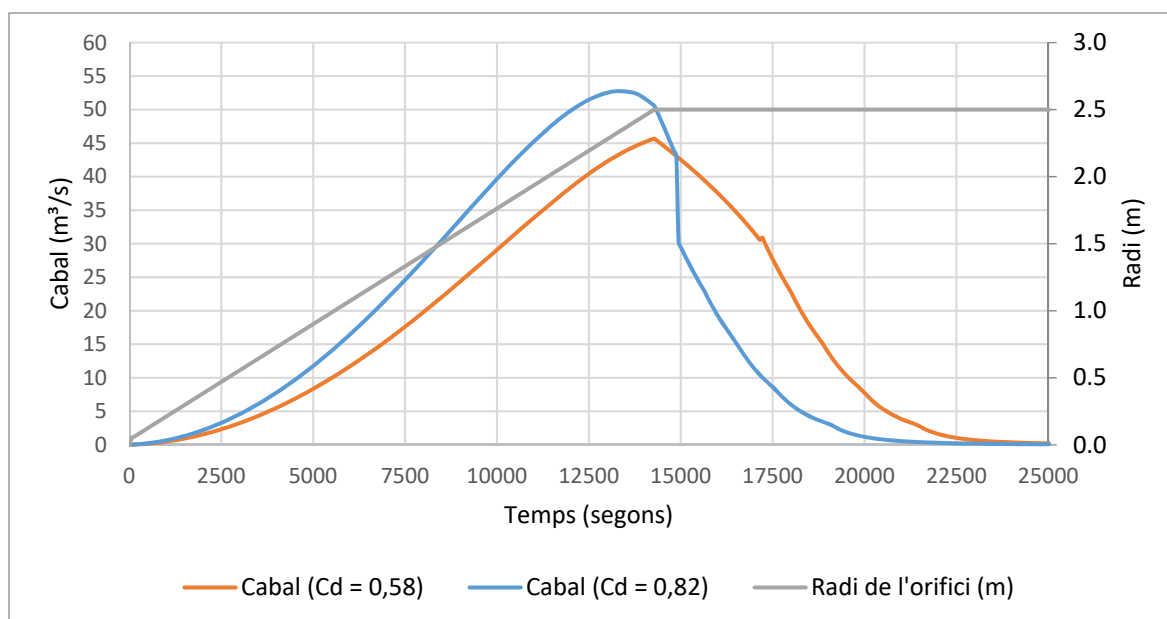


Figura 42. Hidrogràfica de trencament (Hipòtesi 2) - Font: Elaboració pròpia

L'hidrogràfica resultant del trencament del terraplè de la bassa, segons la Hipòtesi 2 de creixement del tub i suposant un coeficient de descàrrega de l'orifici de 0,82, arriba a un cabal màxim de valor 52,76 m³/s a l'instant de temps 13.320 s.

Pel que fa a l'hidrogràfica resultant del trencament del terraplè de la bassa, partint de la mateixa hipòtesi de creixement del tub però amb un coeficient de descàrrega de l'orifici de 0,58, té un pic a l'instant de temps 14.280 s i de valor 45,67 m³/s.

És evident que, a partir de la visualització de les corbes precedents, considerant un valor teòric per al coeficient de descàrrega $C_d = 0,82$, l'hidrogràfica de trencament conté valors més elevats de cabal, així com aquests es produeixen sensiblement més aviat en el temps. A més a més, aquest hidrogràfica es caracteritza per sofrir un salt en el cabal quantificable en 12,69 m³/s a l'instant de temps 14.880 s, que correspon al moment en el qual el nivell d'aigua a l'interior de la bassa s'igualava o quedava just per sota de la cota de la part superior del tub format a causa del trencament. Per corregir aquest desajust, s'ha calibrat el valor del coeficient de descàrrega obtenint un valor de major ajust de 0,58, i que, tal com s'observa a la gràfica precedent, elimina el citat salt en el cabal.

La Hipòtesi 2 de creixement del tub suposa un increment lineal amb el temps de les dimensions del tub, fins a assolir els 5 metres de diàmetre a la secció semicircular. En aquest cas, tal i com s'observa a la següent Figura 43, amb un $C_d = 0,58$ els resultats del model hidràulic simplificat

s'adeqüen pràcticament a la perfecció als valors hipotètics de referència del dia del trencament.

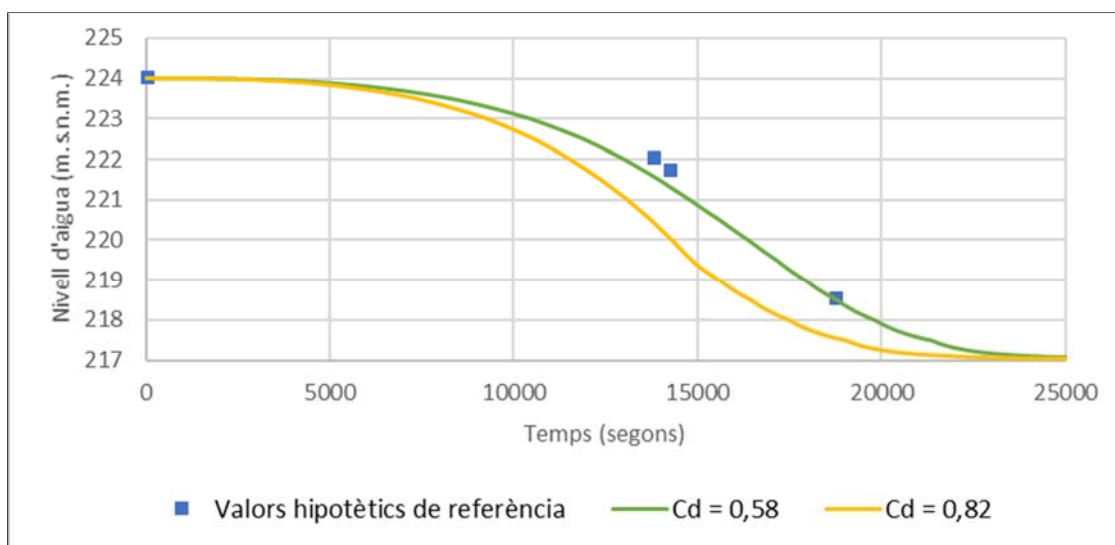


Figura 43. Nivell de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa (Hipòtesi 2) - Font: Elaboració pròpia

Pel que fa a la corba resultant del cas $C_d = 0,82$, a part que s'obtenen resultats físics incoherents en l'hidrograma de trencament, no s'adequa als valors hipotètics de referència. En conclusió, doncs, es pren com a vàlid l'hidrograma de trencament obtingut a partir d'aquest patró de creixement del tub i un coeficient de descàrrega de l'orifici de valor 0,58.

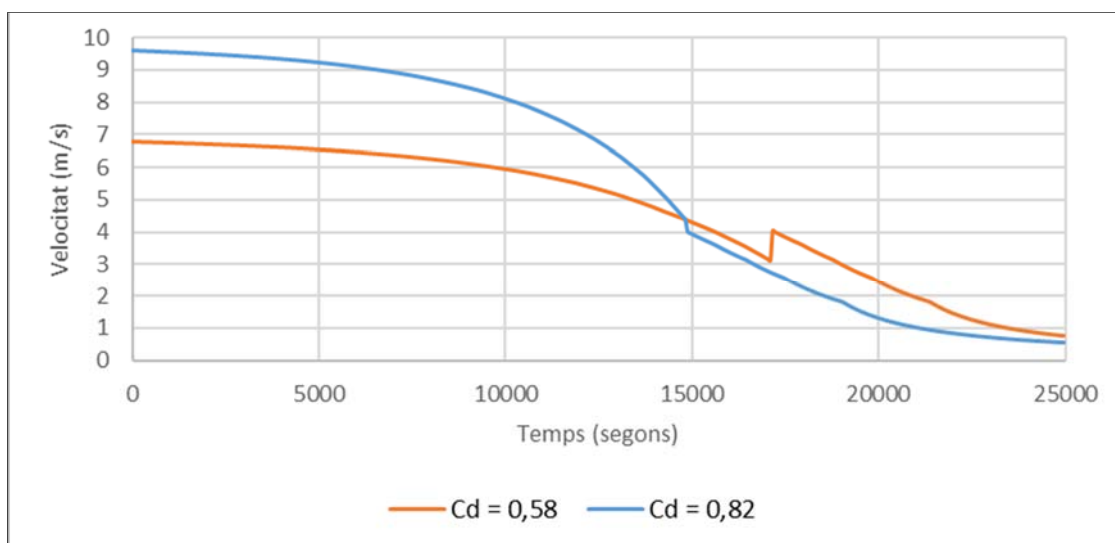


Figura 44. Velocitat de sortida de l'aigua de la bassa (Hipòtesi 2) - Font: Elaboració pròpia

En els dos casos estudiats ($C_d = 0,58$ i $C_d = 0,82$), en excepció del cas $C_d = 0,58$ a l'instant de temps en que canvia la formulació utilitzada pel càlcul del cabal de sortida de la bassa, és a dir, en el moment en que el nivell d'aigua dins la bassa s'igualava o quedava just per sota de la part superior del tub format a causa del trencament, les corbes que representen la velocitat de sortida de l'aigua a través del tub format són decreixents, de tal manera que el màxim es produeix a l'instant inicial (5:42h, quan el tub format té l'àrea mínima i un radi de només 5 cm).

En el cas $C_d = 0,58$, la velocitat màxima de sortida arriba al valor de 6,79 m/s, mentre que en el cas $C_d = 0,82$ aquest valor assoleix els 9,60 m/s.

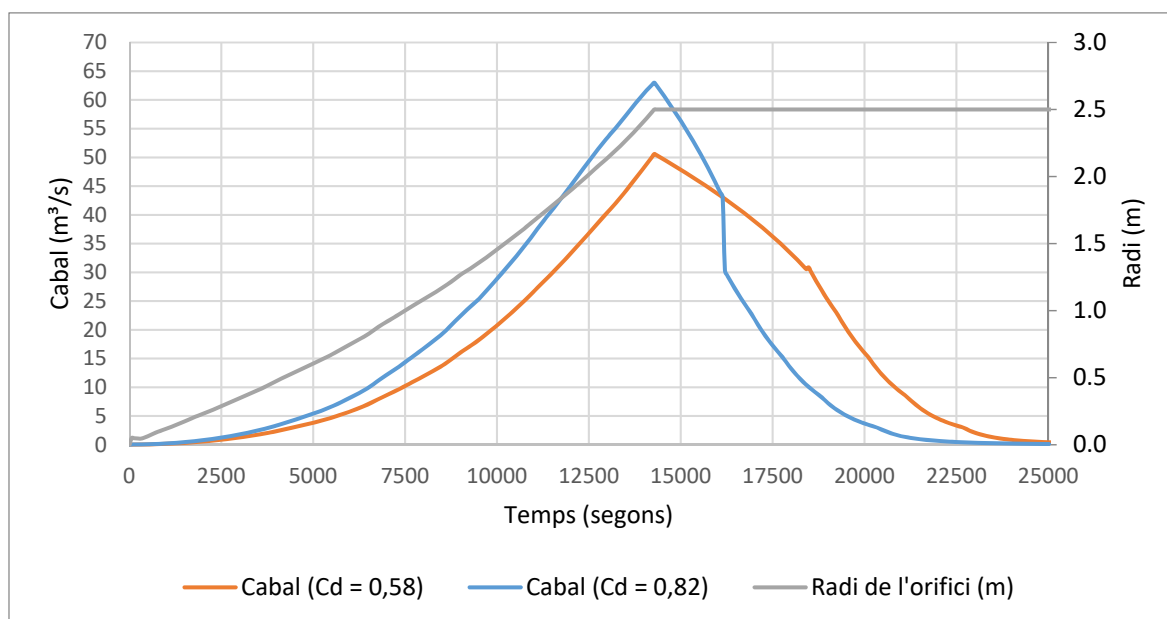
8.5.5.2 Hipòtesi 3: Funció de creixement lleugerament convexa

Figura 45. Hidrogràfic de trencament (Hipòtesi 3) - Font: Elaboració pròpia

L'hidrogràfic resultant del trencament del terraplè de la bassa, segons la hipòtesi 3 de creixement del tub i suposant un coeficient de descàrrega de l'orifici de 0,82, arriba a un cabal màxim de valor 63,00 m³/s a l'instant de temps 14.280 s.

Pel que fa a l'hidrogràfic resultant del trencament del terraplè de la bassa, partint de la mateixa hipòtesi de creixement del tub però amb un coeficient de descàrrega de l'orifici de 0,58, té un pic al mateix instant de temps que en el cas $C_d = 0,82$, és a dir, a l'instant 14.280 s, però de valor clarament inferior (50,59 m³/s).

És evident que, a partir de la visualització de les corbes precedents, considerant un valor teòric per al coeficient de descàrrega $C_d = 0,82$, l'hidrogràfic de trencament conté valors més elevats de cabal, així com aquests creixen més ràpidament en el temps. A més a més, aquest hidrogràfic es caracteritza per sofrir un salt en el cabal quantificable en 12,69 m³/s a l'instant de temps 16.140 s, que correspon al moment en el qual el nivell d'aigua a l'interior de la bassa s'igualava o quedava just per sota de la cota de la part superior del tub format a causa del trencament. Per corregir aquest desajust, s'ha calibrat el valor del coeficient de descàrrega obtenint un valor de major ajust de 0,58, i que, tal com s'observa a la gràfica precedent, elimina el citat salt en el cabal.

La Hipòtesi 3 de creixement del tub suposa un increment del radi del tub lleugerament més lent que el cas lineal (Hipòtesi 2). Aquest creixement més lent fa que el nivell d'aigua present dins la bassa disminueixi més lentament. Amb tot això, a través de la Figura 46 que es mostra a continuació s'observa com, pel cas $C_d = 0,58$, la corba passa lleugerament per sobre dels punts corresponents als valors hipotètics de referència.

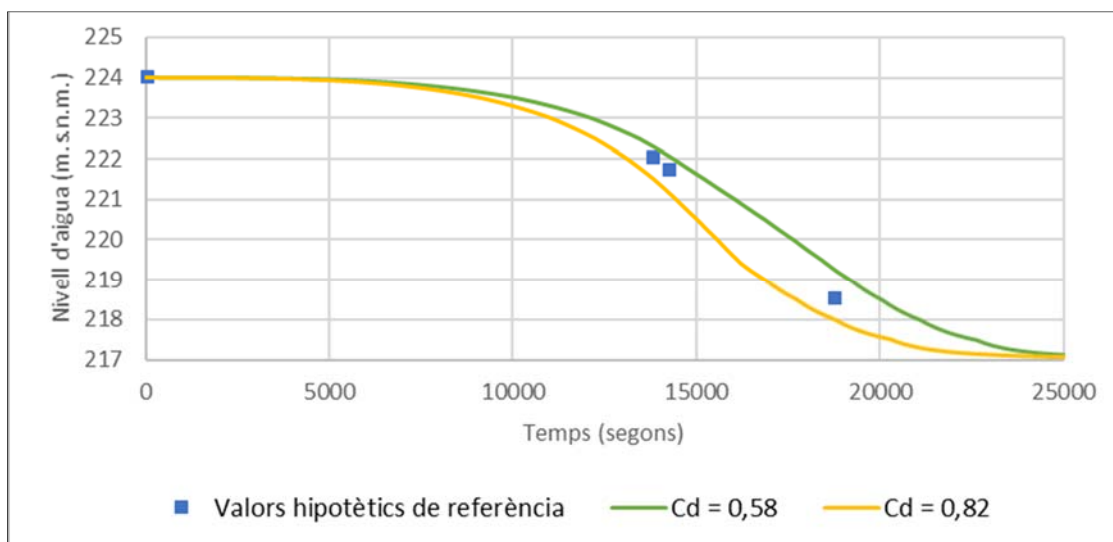


Figura 46. Nivell de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa (Hipòtesi 3) - Font: Elaboració pròpia

Malgrat la lleugera diferència present entre la corba ($C_d = 0,58$) i els punts de referència, partint de la base que aquests últims són hipotètics i s'han extret de l'observació de diverses fotografies, s'estableix també com a vàlid l'hidrogràfic de trencament obtingut a partir d'aquesta hipòtesi de creixement del tub i un $C_d = 0,58$.

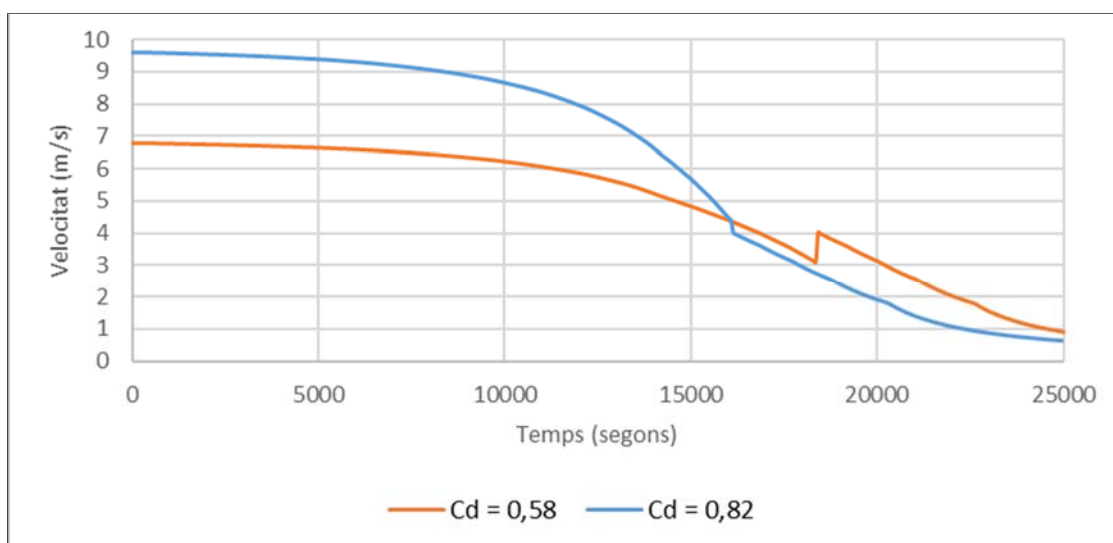


Figura 47. Velocitat de sortida de l'aigua de la bassa (Hipòtesi 3) - Font: Elaboració pròpia

En els dos casos estudiats ($C_d = 0,58$ i $C_d = 0,82$), en excepció del cas $C_d = 0,58$ a l'instant de temps en que canvia la formulació utilitzada pel càlcul del cabal de sortida de la bassa, és a dir, en el moment en que el nivell d'aigua dins la bassa s'igualava o quedava just per sota de la part superior del tub format a causa del trencament, les corbes que representen la velocitat de sortida de l'aigua a través del tub format són decreixents, de tal manera que el màxim es produeix a l'instant inicial (5:42h, quan el tub format té l'àrea mínima i un radi de només 5 cm).

En el cas $C_d = 0,58$, la velocitat màxima de sortida arriba al valor de 6,79 m/s, mentre que en el cas $C_d = 0,82$ aquest valor assoleix els 9,60 m/s.

8.5.6 Resultats de les modelitzacions hidràuliques

8.5.6.1 Hipòtesi 2 (funció de creixement lineal) amb $C_d = 0,58$

A continuació s'adjunten 3 imatges corresponents a diverses zones de l'àmbit d'estudi en les quals es mostren els calats màxims de les zones inundables, obtingudes de la simulació hidràulica amb el model Iber de l'esdeveniment real, considerant l'hidrograma de trencament obtingut a partir de la Hipòtesi 2 de creixement de les dimensions del tub i d'un coeficient de descàrrega igual a 0,58. Així mateix, es superposen les zones inundables de l'escenari de trencament hipotètic H1 segons la normativa i els polígons, traçats a partir de l'observació de diverses fotografies del dia del trencament, amb les probables zones afectades per les inundacions del dia 20 d'abril del 2012.

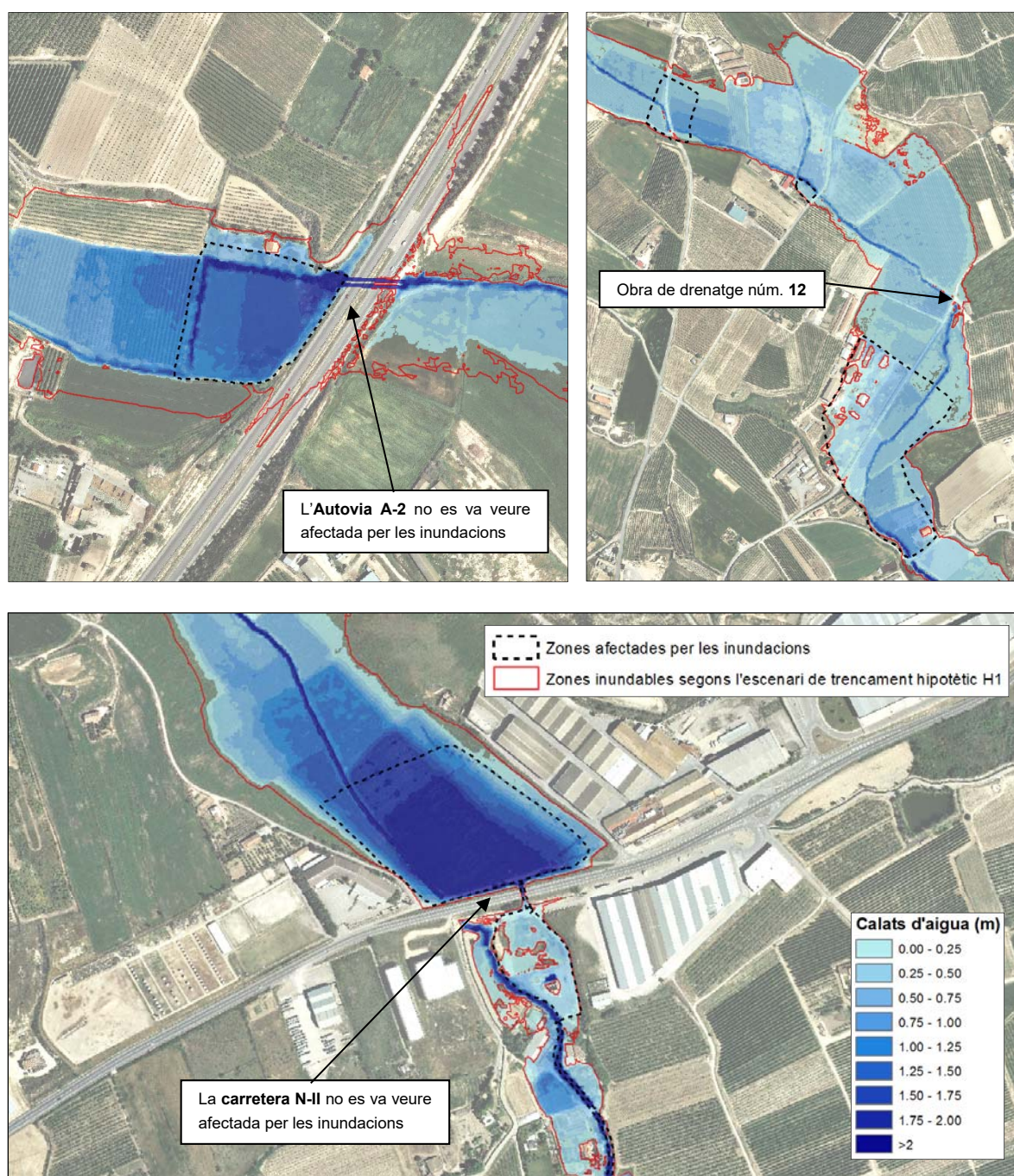


Figura 48. Mapes de calats màxims de l'esdeveniment real (Hipòtesi 2 i $C_d = 0,58$) - Font: Elaboració pròpia

8.5.6.2 Hipòtesi 3 (funció de creixement lleugerament convexa) amb $C_d = 0,58$

A continuació s'adjunten 3 imatges que mostren les mateixes àrees ja vistes en l'apartat anterior de l'àmbit d'estudi, és a dir, la zona de l'Autovia A-2, el tram situat aigua amunt i aigua avall de l'OD_12 i l'àmbit de la carretera N-II (d'aigua amunt cap aigua avall), en les quals es mostren els calats màxims i, en conseqüència, les zones inundables, obtingudes de la simulació hidràulica amb el model Iber de l'esdeveniment real, considerant l'hidrograma de trencament obtingut a partir de la Hipòtesi 3 de creixement de les dimensions del tub i d'un coeficient de descàrrega igual a 0,58. Així mateix, es superposen les zones inundables de l'escenari de trencament hipotètic H1 segons la normativa i els polígons, traçats a partir de l'observació de diverses fotografies del dia del trencament, amb les probables zones afectades per les inundacions del dia 20 d'abril del 2012.

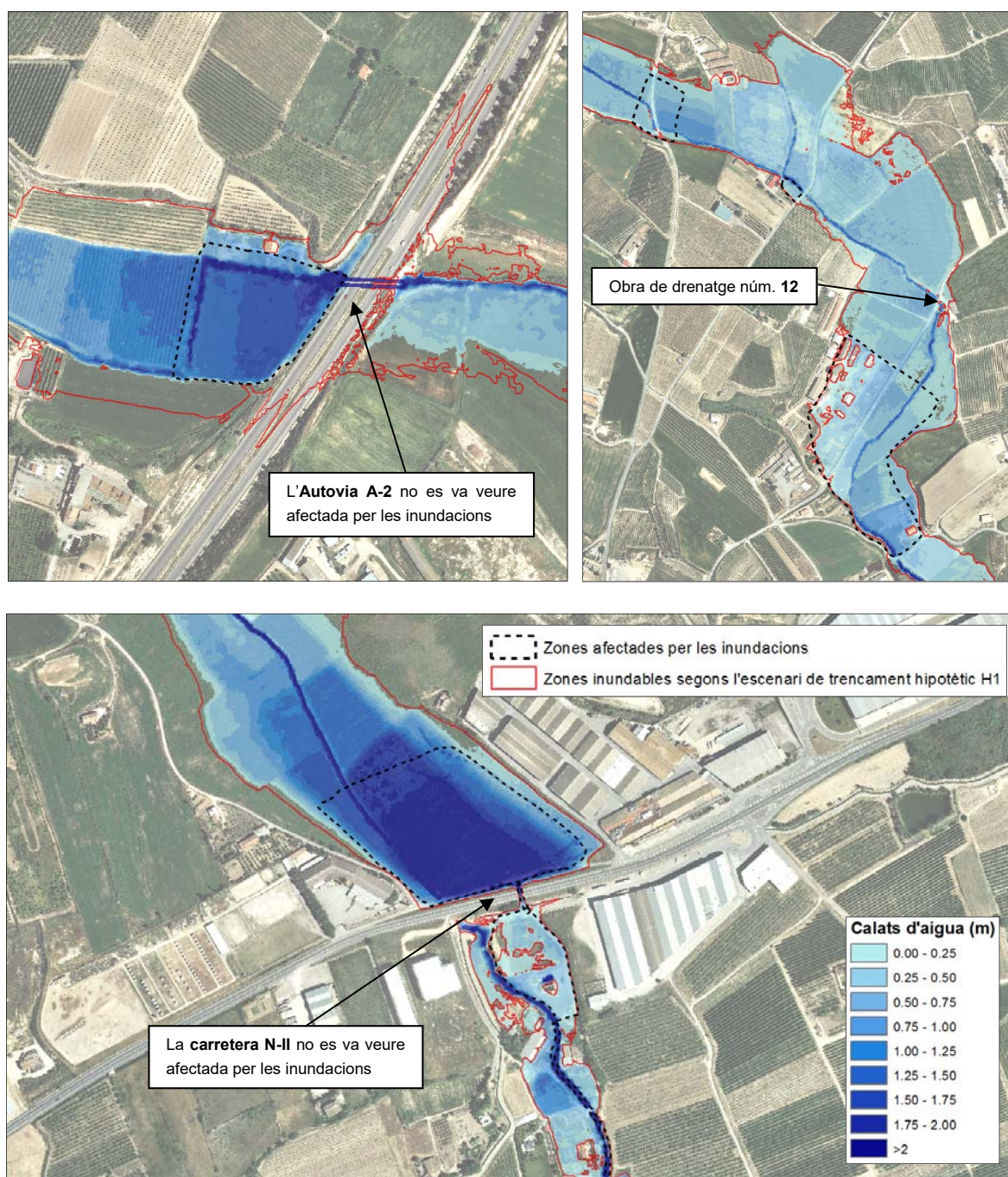


Figura 49. Mapes de calats màxims de l'esdeveniment real (Hipòtesi 3 i $C_d = 0,58$) - Font: Elaboració pròpia

8.5.6.3 Anàlisi comparativa i conclusions

És cert que d'una visualització ràpida de les imatges de les figures anteriors no s'aprecien diferències entre els resultats obtinguts (en aquest cas es fa referència als calats màxims de l'esdeveniment) considerant la Hipòtesi 2 i la Hipòtesi 3 de creixement de les dimensions del tub. No obstant això, les diferències existeixen, malgrat és cert que són més aviat poc significatives, tal i com es pot observar a les següents dues figures en les quals es mostra la diferència de nivells entre els dos escenaris:



Figura 50. Diferència de nivells d'aigua entre els resultats considerant la H2 i H3 de creixement de les dimensions del tub (àmbit comprès entre la bassa de reg i la LAV) - Font: Elaboració pròpia

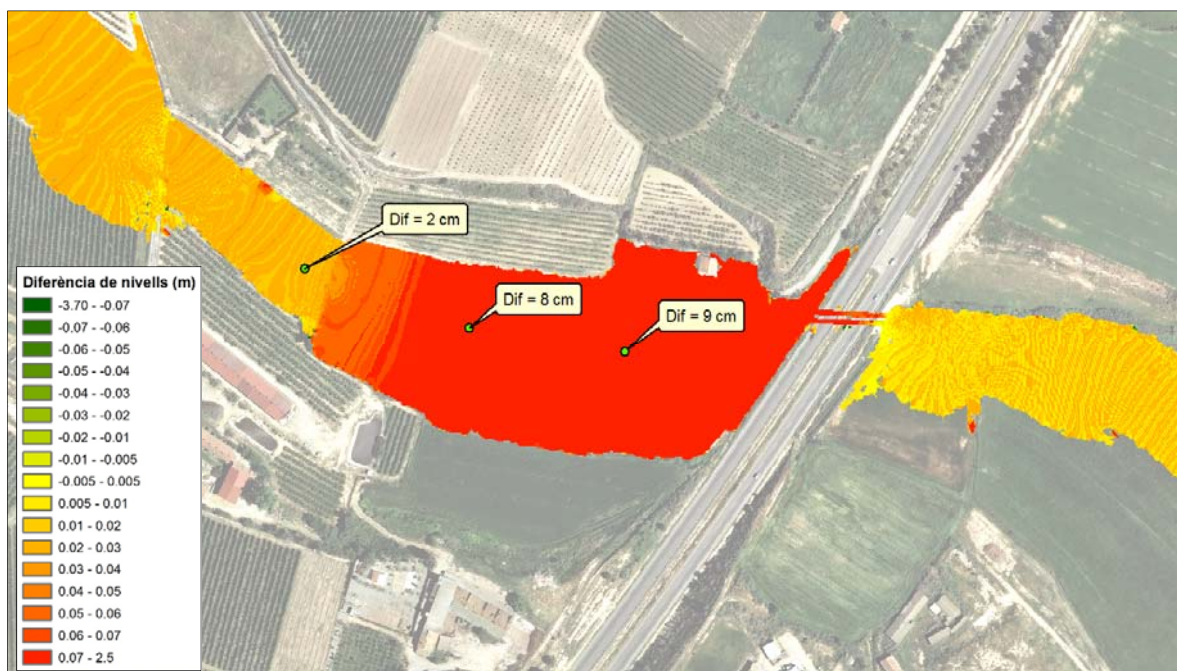


Figura 51. Diferència de nivells d'aigua entre els resultats considerant la H2 i H3 de creixement de les dimensions del tub (àmbit situat aigua amunt de l'Autovia A-2) - Font: Elaboració pròpia

De l'observació de les figures precedents es conclou que a l'àmbit situat aigua amunt de la LAV i de l'Autovia A-2, les diferències màximes són d'ordre centimètric (mínima diferència de 2 centímetres i màxima d'11 cm i 9 cm just aigua amunt del terraplè de la LAV i de l'Autovia A-2, respectivament).

Clarament la diferència entre els resultats dels models hidràulics es fa més notable a les zones d'aigua amunt de les tres grans infraestructures lineals que creuen la llera de la riera dels Reguers, pel fet d'existir unes destacades obstruccions que comporten sobreelevacions en la làmina d'aigua. Malgrat no es mostra en la present memòria, a l'àmbit situat aigua amunt de la carretera N-II, les diferències són també de l'ordre del centímetre (en aquest cas, però, la mínima diferència és d'1 cm i la màxima de 4 cm just aigua amunt del terraplè de la carretera N-II).

A la resta d'àmbits objectes d'estudi allunyats dels terraplens de les tres grans infraestructures lineals, els resultats dels models hidràulics dels dos escenaris estudiats (Hipòtesi 2 i Hipòtesi 3 de creixement de les dimensions del tub) difereixen en menor mesura, quantificant-se la diferència amb valors de l'ordre d'1 o 2 centímetres en la majoria dels casos.

Fins ara s'ha fet referència solament a la diferència de nivells, és a dir, a la component vertical del flux d'aigua, de manera que també convé comparar els resultats pel que fa a zones afectades o zones inundables (component horitzontal). A aquest efecte es mostra la figura adjuntada a la dreta, que es pot considerar representativa del comportament en tot l'àmbit d'estudi.

Tal i com es pot observar, la zona inundable és pràcticament coincident en els dos escenaris estudiats, és a dir, considerant els dos casos diferents de creixement de les dimensions del tub. És difícil detectar alguna diferència a simple vista. Això implica que l'extensió de la inundació es pot considerar idèntica en els dos casos i l'única diferència recau en el calat d'aigua (component vertical del flux).

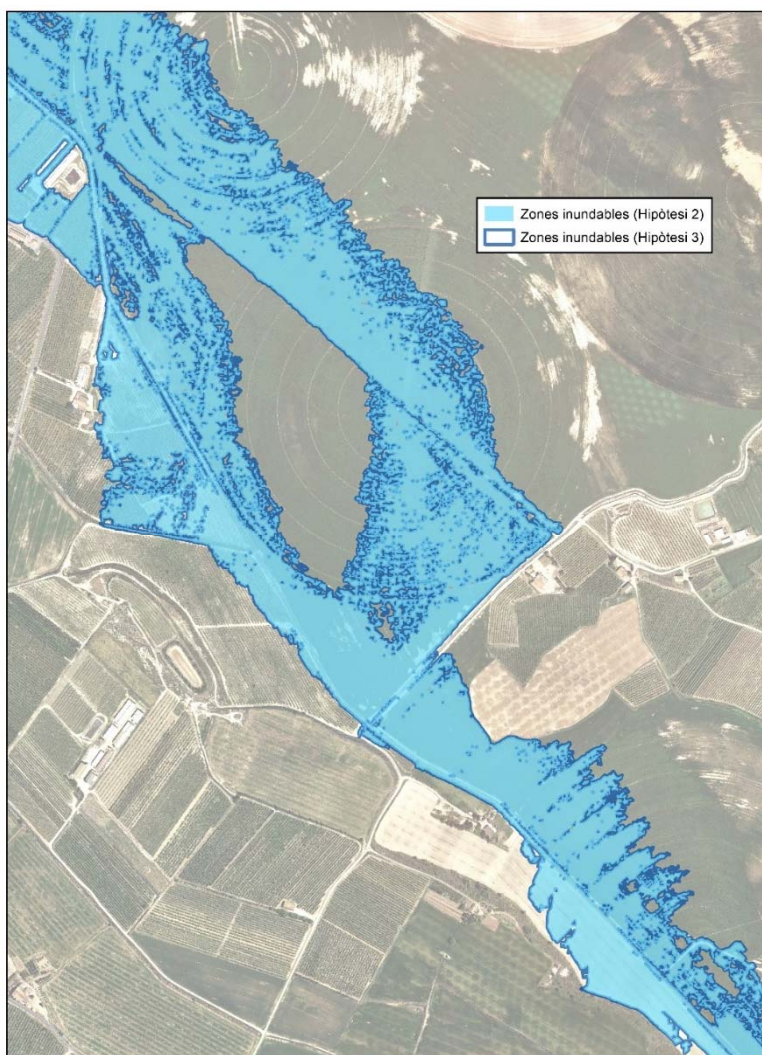


Figura 52. Zones inundables resultants de la simulació del trencament real segons la H2 i H3 de creixement de les dimensions del tub - Font: Elaboració pròpia

La diferència de nivells, o de calats, en els resultats és deguda al diferent hidrograma d'entrada introduït al model hidràulic 2D Iber, que coincideix amb l'hidrograma de trencament del terraplè de la bassa de reg. La resta de paràmetres del model són idèntics (Model Digital del Terreny, coeficients de rugositat de Manning, estructures, paràmetres de temps, mallat, etc.), per la qual cosa la diferència en els resultats és fàcilment atribuïble a la variable citada. Tot seguit es mostra un gràfic amb els dos hidrogrames d'entrada superposats, per tal de poder-los comparar:

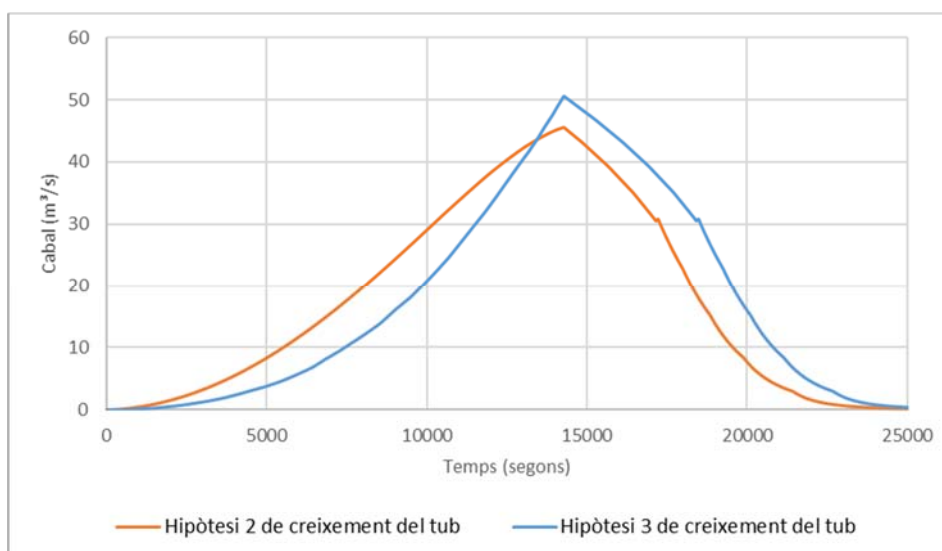


Figura 53. Hidrogrames de trencament del terraplè de la bassa de reg segons la Hipòtesi 2 i la Hipòtesi 3 de creixement de les dimensions del tub ($C_d = 0,58$) - Font: Elaboració pròpia

De l'observació de les corbes precedents es poden extreure les següents conclusions:

- Considerant la Hipòtesi 2 de creixement de les dimensions del tub (es suposa un augment lineal amb el temps de les dimensions del tub), s'obté un cabal punta de 45,67 m³/s.
- Considerant la Hipòtesi 3 de creixement de les dimensions del tub (es puntualitza que en aquesta Hipòtesi es suposa un creixement del tub lleugerament més lent que el cas lineal - la forma de la funció és lleugerament convexa) s'arriba a un cabal pic de 50,59 m³/s.
- Fins a arribar al cabal pic, la corba de la Hipòtesi 2 està pràcticament sempre per sobre de la corba de la Hipòtesi 3, cosa lògica tenint en compte que en la Hipòtesi 2 el tub augmenta de dimensions més ràpidament. Orientativament, a l'instant de temps 10.000 segons de la modelització, el cabal de sortida en la Hipòtesi 2 està al voltant dels 30 m³/s, mentre que en la Hipòtesi 3 està tan sols lleugerament per sobre dels 20 m³/s.
- Al tram de baixada de les dues corbes succeeix el contrari que al tram d'augment, i és que la corba de la Hipòtesi 3 està sempre per damunt de la corba de la Hipòtesi 2.
- **Els nivells d'aigua o calats obtinguts de les modelitzacions hidràuliques en l'àmbit objecte d'estudi són majors en el cas de considerar la Hipòtesi 3 de creixement de les dimensions del tub.** Aquest fet és degut majoritàriament al valor del cabal punta de l'hidrograma de trencament, que és un 10,77% més elevat en el cas de la Hipòtesi 3. Així mateix, està clarament condicionat pel fet que just passat el cabal punta, en l'hidrograma de trencament considerant la Hipòtesi 3, durant un període de temps de 20 minuts, es produeixen cabals de sortida de l'interior de la bassa superiors al cabal punta de l'hidrograma de trencament obtingut a partir de considerar la Hipòtesi 2 de creixement de les dimensions del tub.

A més a més, la utilització d'hidrogrames de trencament del terraplè de la bassa diversos resulta en diferències en les variables hidràuliques des d'un punt de vista temporal. Aquestes diferències s'observen clarament amb els resultats de les zones inundables als 30 minuts i a l'hora després de l'inici del trencament (es recorda que, en aquest estudi, segons les dades disponibles, es considera com a hora d'inici del trencament les 5:41 hores de la matinada).

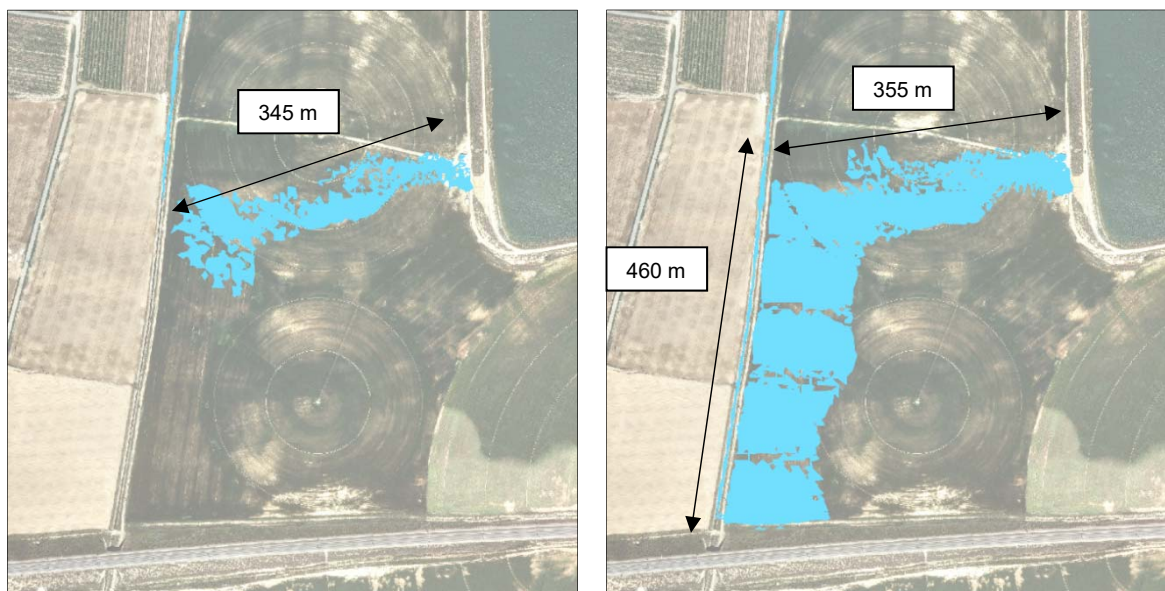


Figura 54. Zona inundable a la primera mitja hora després del trencament (esquerra) i zona inundable al cap d'una hora del trencament (dreta) – Hipòtesi 2 de creixement de les dimensions del tub (Font: Elaboració pròpia)

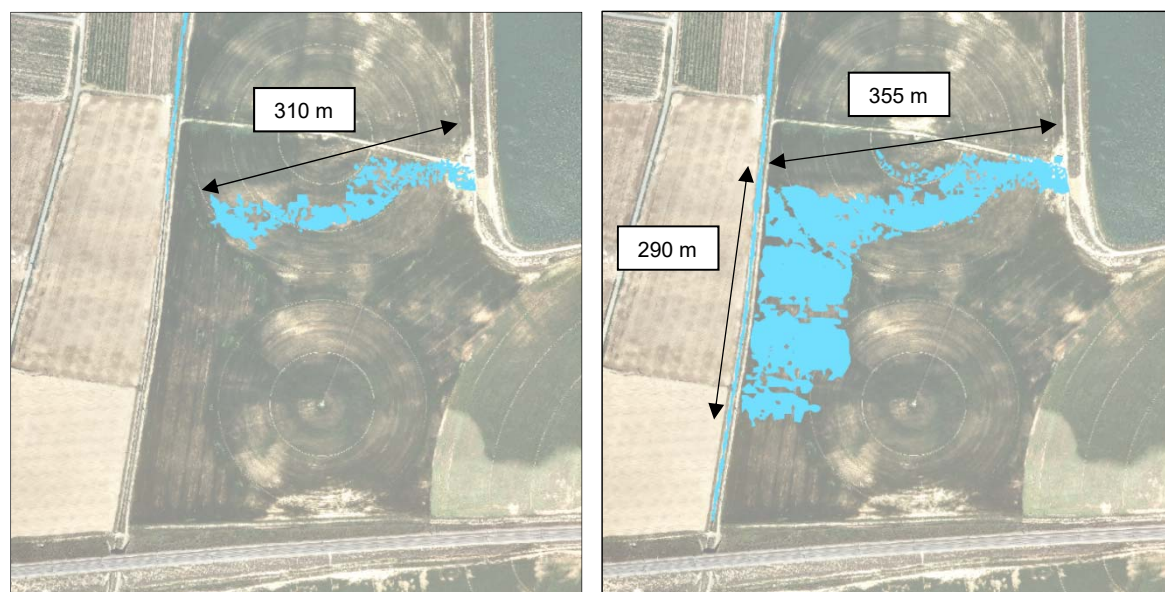


Figura 55. Zona inundable a la primera mitja hora després del trencament (esquerra) i zona inundable al cap d'una hora del trencament (dreta) – Hipòtesi 3 de creixement de les dimensions del tub (Font: Elaboració pròpia)

A la vista de les zones inundables representades a les figures precedents, es conclou que, considerant la Hipòtesi 2 de creixement de les dimensions del tub, el volum d'aigua que hauria sortit al cap de mitja hora i al cap d'una hora del trencament seria superior en comparació amb el cas de la Hipòtesi 3. Això és a causa de que fins a arribar al cabal màxim de sortida, la corba de l'hidrograma de la Hipòtesi 2 està gairebé sempre per sobre de la corba de l'hidrograma de la Hipòtesi 3 (a la Hipòtesi 2 es simula un augment més veloç del diàmetre del tub semicircular i, conseqüentment, el cabal de sortida és major durant un temps prolongat). De forma concreta, al

cap d'una hora de l'inici del trencament (6:41h), el cabal de sortida per la secció de l'esvoranc és de 4,54 m³/s en el cas de la Hipòtesi 2 i d'1,86 m³/s en el cas de la Hipòtesi 3.

Una vegada analitzats i comparats els resultats obtinguts de les simulacions hidràuliques bidimensionals considerant l'hidrogràfic de trencament resultant de la Hipòtesi 2 i de la Hipòtesi 3 de creixement de les dimensions del tub, el següent pas consisteix en escollir quin dels dos casos de simulació de la formació i progressió de la bretxa s'adequa més a la realitat succeïda durant el dia del trencament real, és a dir, el 20 d'abril del 2012.

És evident que, segons els resultats obtinguts i tal i com s'ha comentat anteriorment, els dos casos estudiats no difereixen gaire entre ells, fins al punt que afecten pràcticament els mateixos àmbits i parcel·les (les zones inundables en els dos casos es poden considerar idèntiques) i tan sols difereixen en pocs centímetres pel que fa als calats d'aigua (s'arriba a una màxima diferència de tan sols 11 centímetres aigua amunt del terraplè de la Línia d'Alta Velocitat). Addicionalment, les zones inundables resultants en els dos casos coincideixen relativament bé amb els polígons que identifiquen o contenen les zones afectades per les inundacions durant el dia 20 d'abril del 2012, polígons que s'han traçat a partir de l'anàlisi de les fotografies que es mostren a l'Annex núm. 2: *Reconstrucció cronològica de l'esdeveniment*. És a dir, **quant a les afeccions i a l'extensió de la inundació, els dos models hidràulics bidimensionals creats amb la finalitat de reproduir l'esdeveniment real s'adeqüen bastant bé a la realitat succeïda.**

És lògic que, segons els comentaris efectuats anteriorment, es podrien considerar com a vàlids els dos casos modelats hidràulicament, atenent a la gran similitud entre els resultats obtinguts des de la zona aigua avall de la bassa de reg i fins a la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre. No obstant això, existeix una variable que pot ajudar notablement a la presa de la decisió final sobre quin dels dos casos modelats és més idoni i s'adequa millor a la realitat succeïda: **el nivell de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa en diversos instants de temps**. Així doncs, en els següents paràgrafs s'intenta explicar, des del punt de vista d'aquesta variable pròpia de l'interior de la bassa de reg, quin dels dos casos modelats s'aproxima més a la realitat ocorreguda.

Com és sabut, gràcies a la disposició de diverses fotografies del mateix dia del trencament del terraplè de la bassa de reg resulta possible conèixer, de forma si més no aproximada, el nivell d'aigua dins la bassa en diversos instants de temps. Concretament, les fotografies realitzades a les 5:42h, 9:32h, 9:39h i 10:54h són útils per a aquest propòsit, ja que s'observa l'aigua i el seu nivell aproximat a l'interior de la bassa mentre el flux surt per la bretxa formada.

El problema d'aquest mètode recau en que existeix la possibilitat de cometre errors. Com és obvi, la determinació del nivell d'aigua a simple vista a partir de la visualització d'unes fotografies pot conduir a valors inexactes, perquè la seva determinació ve condicionada per diversos factors i errors que es podrien qualificar com a inherents del mètode emprat. Per tant, doncs, els quatre nivells de la làmina d'aigua corresponents a diversos instants de temps que s'especifiquen a l'Apartat 8.5.3.1. d'aquesta memòria no són ni molt menys exactes.

Dels quatre valors especificats, n'hi ha tres que es poden qualificar com a menys fiables, ja que probablement el quart s'acosta bastant a la realitat dels fets. Aquests tres els quals es fa referència són els inicials, és a dir, el de les 5:42h, el de les 9:32h i el de les 9:39h. A les 5:42h se suposa que la làmina d'aigua es trobava a la cota 224 m.s.n.m. perquè es pot intuir el nivell inicial abans del trencament per la presència d'una part del talús interior mullat a la fotografia de les 9:39h. El

nivell d'aigua a les 9:32h és difícilment previsible atenent a la fotografia de les 9:32h disponible, a través de la qual es veu una part molt reduïda del talús interior del terraplè de la bassa de reg. No obstant això, referent a les 9:39h sí que es disposa d'una bona fotografia, tot i que l'única referència per a predir el nivell de la làmina d'aigua en aquest instant és la distància que separa la làmina d'aigua de la cota de coronació del dic de terres. Finalment, el nivell d'aigua més fiable és, sens dubte, el de les 10:54h que, gràcies a conèixer les dimensions del tub format a causa del trencament en el seu estat final (el Sr. Jordi Charles i Companys, gerent de l'Ajuntament d'Alcarràs, va facilitar-me aquesta valuosa informació, remarcant que el tub que es va formar tenia una forma assimilable a un semicercle de 5 metres de diàmetre), es pot afirmar, sense cometre gaire error, que el calat d'aigua a l'interior de la bassa, a les 10:54h del dia del trencament, era de l'ordre dels 1,5 metres (Figura 56, nivell d'aigua a la cota 218,5 m.s.n.m.).



Figura 56. Vista en alçat de l'esvoranc a les 10:54 hores del dia 20/04/2012 (Font: Ajuntament d'Alcarràs)

A continuació s'adjunten en un mateix gràfic les dues corbes que representen la variació del nivell d'aigua a l'interior de la bassa en funció del temps (es compara la Hipòtesi 2 amb la 3).

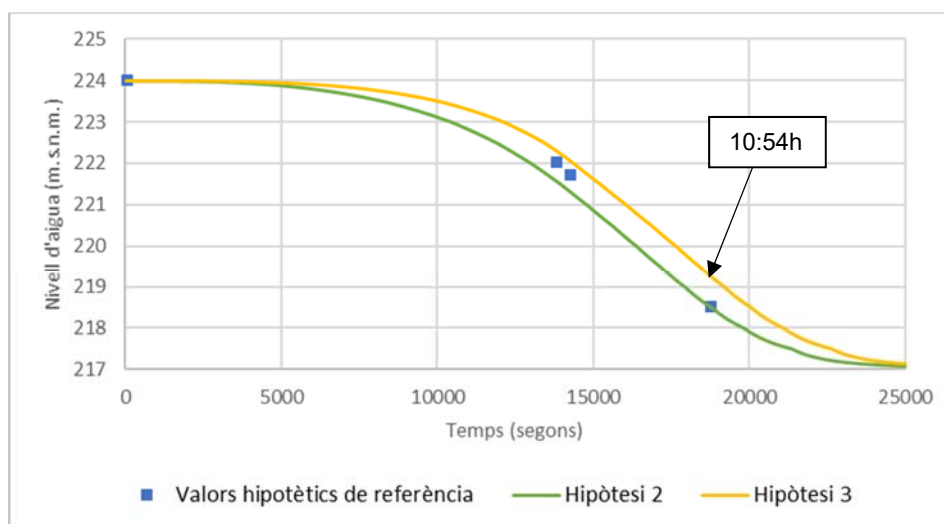


Figura 57. Nivell de la làmina d'aigua en funció del temps a l'interior de la bassa de reg considerant la Hipòtesi 2 i 3 de creixement de les dimensions del tub (Font: elaboració pròpia)

Tal i com s'observa, considerant la Hipòtesi 3 de creixement de les dimensions del tub, resulta un nivell d'aigua a l'interior de la bassa sensiblement massa elevat a les 10:54h, superant lleugerament la cota 219 m.s.n.m. (el tub semicircular que es va formar, en el seu estat final, tenia una cota a la seva part superior de l'ordre de 219,5 m.s.n.m.). A més a més, com es pot observar, **la corba de la Hipòtesi 2 coincideix pràcticament de forma exacta amb el valor hipotètic de referència** determinat a partir de l'observació de la fotografia mostrada a la Figura 56 anterior, de tal forma que **la Hipòtesi 2 es considera com el patró d'augment de les dimensions del tub més probable i que reproduïx amb més exactitud els fets del trencament produït el dia 20 d'abril del 2012 al Terme Municipal d'Alcarràs.**

8.6 Anàlisi comparativa. Escenari contemplat a la Guia Tècnica – Esdeveniment real

Una vegada justificat en l'apartat anterior que la Hipòtesi 2 és el patró temporal que reproduïx amb més exactitud el probable creixement de les dimensions de l'esvoranc semicircular format a la realitat i, en conjunt, els fets ocorreguts durant el dia 20 d'abril del 2012 al Terme Municipal d'Alcarràs, a les següents pàgines es realitza una extensa i detallada comparació, des de diversos punts de vista, entre els resultats obtinguts del model hidràulic en que es reproduïx l'escenari de trencament hipotètic contemplat a la Guia Tècnica i els resultats de la reproducció hidràulica de l'esdeveniment real.

En primera instància es fa referència a la diferència de nivells entre els dos escenaris estudiats. La diferència entre els resultats dels dos escenaris objectes de la comparació es fa més notable a les zones d'aigua amunt de les tres grans infraestructures lineals que creuen la riera dels Reguers, donat que els terraplens actuen com si fossin preses. Com es pot veure tot seguit, aigua amunt del terraplè de la LAV i del terraplè de l'Autovia A-2 és on es produeixen les majors diferències.



Figura 58. Diferència de nivells entre l'esdeveniment real i l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica (àmbit situat aigua avall de la bassa de reg i fins passat el terraplè de la LAV Madrid-Barcelona) - Font: elaboració pròpia



Figura 59. Diferència de nivells entre l'esdeveniment real i l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica (àmbit situat al voltant de l'Autovia A-2) - Font: elaboració pròpia

Pel que fa a l'àmbit situat aigua avall de la bassa de reg i fins al terraplè de la LAV Madrid-Barcelona (Figura 58), és on es registra una major diferència de nivells entre els dos escenaris objectes d'estudi. Concretament s'assoleix el valor màxim de 2,22 metres (en valor absolut) en una zona situada al marge dret de la riera dels Reguers i just a tocar del terraplè. En una extensió important de terreny situat aigua amunt del terraplè, la diferència de nivells no baixa del metre, de tal manera que és l'àmbit on es produeixen les majors diferències de nivells.

Quant al sector situat aigua avall del terraplè de la LAV Madrid-Barcelona, la diferència de nivells entre els dos casos estudiats es redueix considerablement, essent la diferència mitjana de l'ordre dels 30-40 centímetres. Cal remarcar que la diferència de 6,28 metres en valor absolut que figura a l'interior de la bassa prové del fet que en el cas de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica s'ha imposat la condició inicial de nivell d'aigua a l'interior de la bassa i que l'aigua flueixi per la bretxa a mesura que es va formant. En canvi, en el cas del model hidràulic de l'esdeveniment real, no s'ha imposat cap mena de condició a l'interior de la bassa i s'ha considerat com a terreny sec.

En el cas de l'àmbit situat al voltant de l'Autovia A-2 (Figura 59), s'arriba a una diferència de nivells màxima de l'ordre dels 1,18 m en valor absolut. Aquest màxim es produeix, com és normal, just aigua amunt del terraplè de la infraestructura. Igualment com passa en l'àmbit situat aigua amunt de la Línia d'Alta Velocitat Madrid-Barcelona, a mesura que el punt d'estudi es troba més allunyat del terraplè, la diferència de nivells es redueix.

En referència a aquest àmbit, és important destacar el fet que l'Autovia A-2 s'inundaria en el suposat cas que el terraplè de la bassa trenqués segons els criteris de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica, mentre que segons els resultats del model hidràulic que reproduïx l'esdeveniment real no s'inundaria, gràcies a la suficient capacitat hidràulica de les dues obres de drenatge emplaçades al llarg del terraplè de l'Autovia A-2. Segons es coneix, durant el transcurs del dia 20 d'abril del 2012, l'Autovia A-2 no es va veure afectada per les inundacions, fet que confirma la validesa en aquest sentit dels resultats del model hidràulic en aquesta porció de l'àmbit d'estudi.



Figura 60. Diferència de nivells entre l'esdeveniment real i l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica (àmbit pròxim a la confluència entre la Sèquia i la riera dels Reguers) - Font: elaboració pròpia

A través de la Figura 60 anterior es mostra un àmbit on no existeix cap mena d'infraestructura lineal que pugui causar sobreelevacions importants de la làmina d'aigua. S'observa d'una forma clara com les diferències de nivells estan molt més acotades que les que es produeixen en l'àmbit situat aigua amunt de la LAV, per exemple, mantenint-se els valors a l'entorn dels 30-40 i fins als 50 centímetres de diferència que ja es produïen a poca distància aigua avall del terraplè de la LAV Madrid-Barcelona. A les zones on el flux és molt difús les diferències ja són molt menors (al voltant dels 10 centímetres en l'àmbit de la Figura 60).

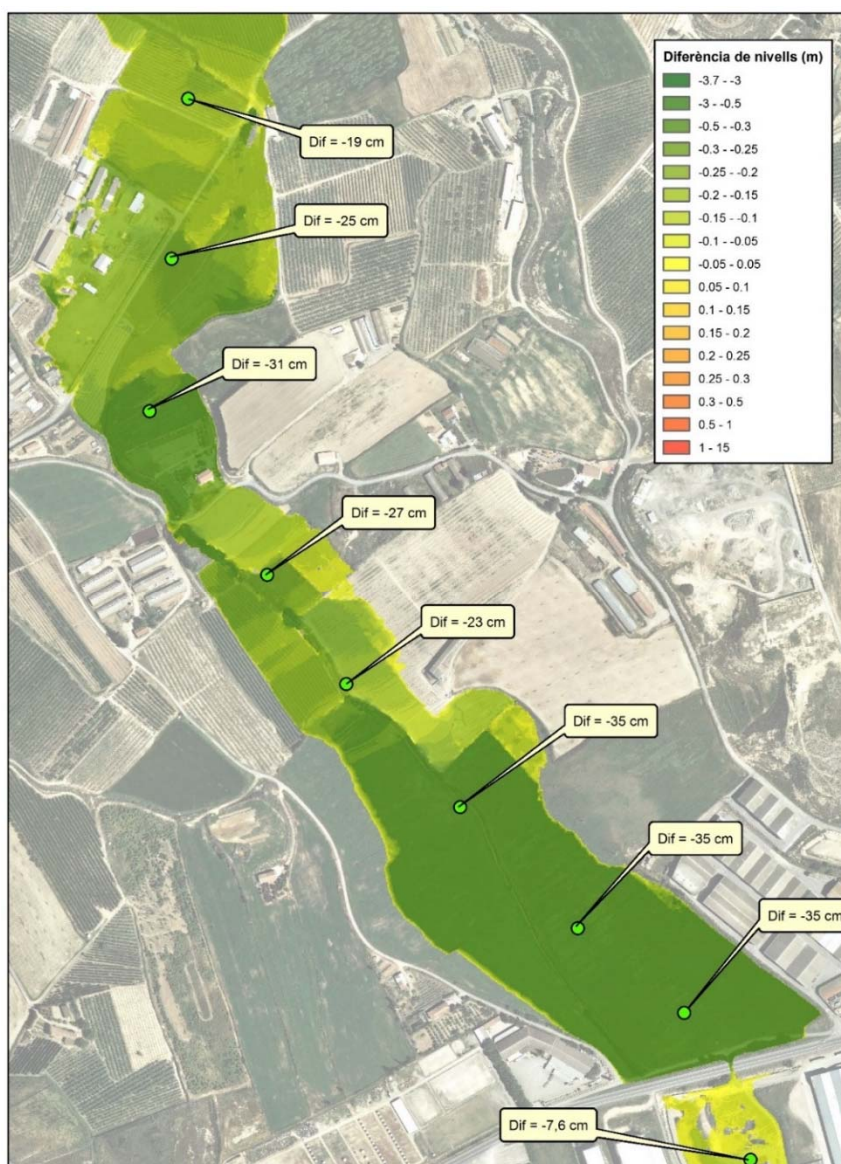


Figura 61. Diferència de nivells entre l'esdeveniment real i l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica (àmbit situat aigua amunt de la carretera N-II) - Font: elaboració pròpia

Tal i com s'observa a la Figura 61 precedent, a l'àmbit situat aigua amunt de la carretera N-II, les diferències entre els dos escenaris estudiats són encara bastant notables, produint-se diferències de fins a 35 centímetres a la zona situada just aigua amunt del terraplè de la carretera N-II. A mesura que el punt d'estudi es troba més distant respecte de l'eix de la carretera N-II, la diferència de nivells és menor, encara que no és una regla general ja que depèn de la zona objecte d'anàlisi. En canvi, a la zona de l'antiga depuradora d'Alcarràs, sector situat aigua avall de la carretera N-II, la diferència de nivells es redueix considerablement, arribant-se a produir diferències de l'ordre dels 5-10 centímetres.

Fins al moment s'ha fet referència únicament a la diferència de nivells, és a dir, a la component vertical del flux d'aigua, de manera que també convé comparar els resultats pel que fa a zones afectades o zones inundables (component horitzontal). Amb aquest propòsit es mostra la següent figura, que correspon amb l'àmbit comprès entre la bassa de reg i la Sèquia dels Reguers:

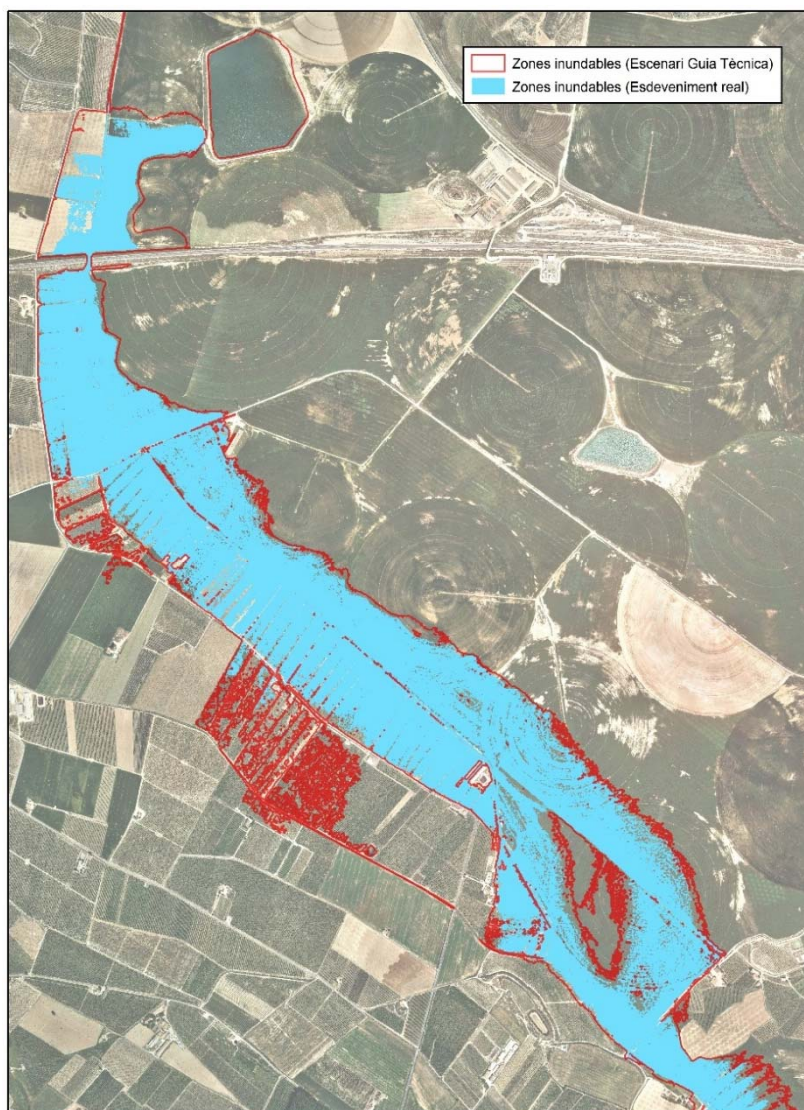


Figura 62. Zones inundables resultants de la modelització hidràulica de l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica i de l'esdeveniment real (àmbit comprès entre la bassa de reg i la Sèquia dels Reguers) - Font: elaboració pròpia

De forma general, en l'àmbit mostrat a la Figura 62 anterior, s'observa com les zones inundables són més extenses en el cas de considerar l'escenari de trencament contemplat a la Guia Tècnica, fent-se realment notable aquesta diferència en l'àmbit de terreny situat entre la bassa de reg i el terraplè de la LAV Madrid-Barcelona. Aigua avall d'aquesta infraestructura ferroviària les diferències són menys acusades, tot i que existeixen dues zones situades al marge dret de la riera dels Reguers que són inundables en el cas del trencament segons l'escenari contemplat a la Guia Tècnica i que no ho són, en canvi, en el cas de considerar l'esdeveniment real.

A la figura de la pàgina següent es mostren les zones inundables obtingudes de la simulació hidràulica dels dos escenaris estudiats de l'àmbit situat entre l'Autovia A-2 i la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre.

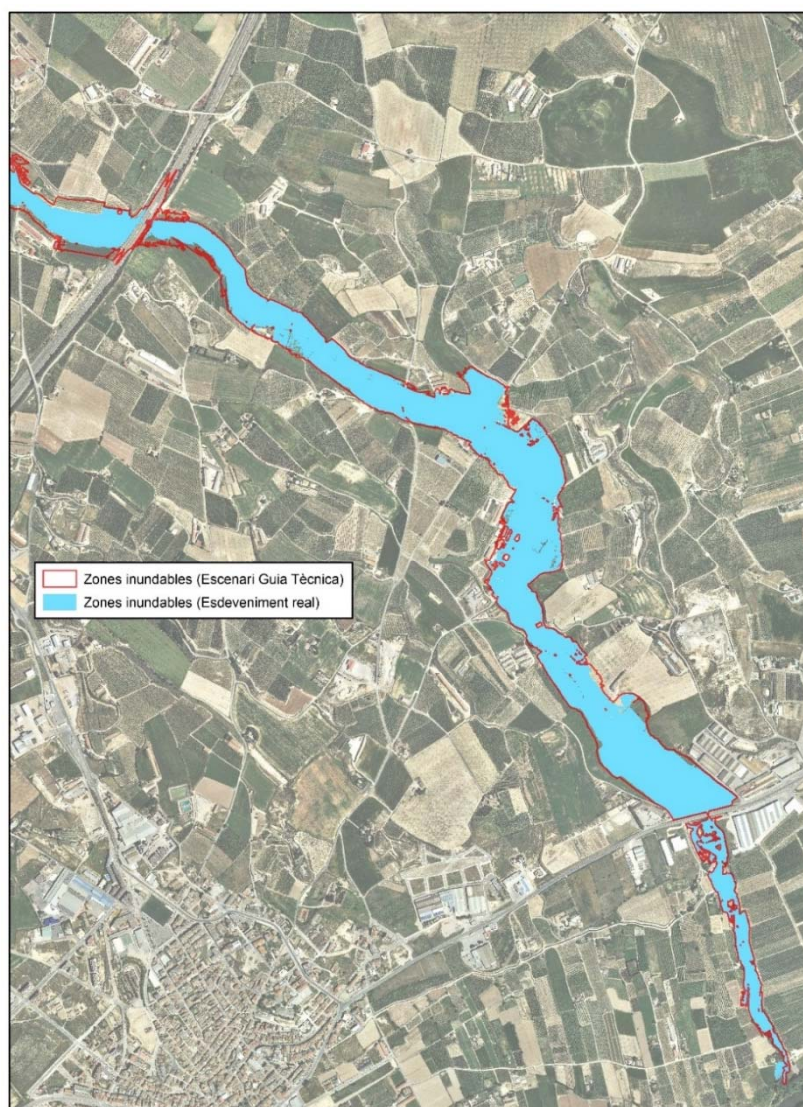


Figura 63. Zones inundables resultants de la modelització hidràulica de l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica i de l'esdeveniment real (àmbit comprès entre l'Autovia A-2 i el riu Segre) - Font: elaboració pròpia

Just al costat d'aigua amunt de l'Autovia A-2 s'aprecien diferències significatives quant a l'extensió de les zones inundables. Això és degut, en primera instància, a la destacada diferència entre els cabals d'avinguda que arriben a la zona de l'Autovia A-2 i, en segon lloc, a l'efecte presa del terraplè de l'Autovia A-2, on només existeixen dues obres de drenatge de forma aproximadament semicircular i d'uns 2-2,5 metres de radi que permeten el pas de l'aigua a través del terraplè de terres. La gran diferència entre els cabals d'arribada en els dos escenaris estudiats fa que en el cas de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica es registrin nivells d'aigua molt més elevats aigua amunt de l'estructura de terres, fins al punt que el nivell d'aigua sobrepassa la cota de la rasant de l'Autovia A-2 i es produeixen desbordaments afectant una extensió destacable de la pròpia Autovia. En canvi, en el cas del trencament real, les dues obres de drenatge tenen suficient capacitat com per evacuar l'aigua embassada aigua amunt del terraplè de l'Autovia A-2 (malgrat també es produeixen sobreelevacions importants aigua amunt) i evitar la inundació sobre la calçada de l'Autovia.

És remarcable la semblança existent entre les zones inundables a partir de l'Autovia A-2 i fins a la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre. Malgrat en algunes zones es detecten

diferències, a la majoria dels indrets els límits coincideixen relativament bé. Aquesta relativa coincidència és deguda a la particular orografia de la zona fluvial i de les terrasses d'inundació adjacents, on predominen planes d'inundació d'amplada reduïda, i amb la presència d'importants desnivells als seus límits, que impossibiliten una major extensió de l'aigua.

L'observada diferència de nivells i de zones inundables es deu al diferent hidrograma d'entrada reproduït en el model hidràulic bidimensional Iber, que coincideix amb l'hidrograma de trencament del terraplè de la bassa de reg. La resta de paràmetres del model són idèntics (Model Digital del Terreny, coeficients de rugositat de Manning, estructures, paràmetres de temps, mallat, etc.), per la qual cosa la diferència en els resultats és fàcilment atribuïble a aquesta variable. A continuació es mostra un gràfic amb els dos hidrogrames de trencament del terraplè de la bassa de reg superposats, amb la finalitat de poder comparar els dos escenaris objectes d'estudi:

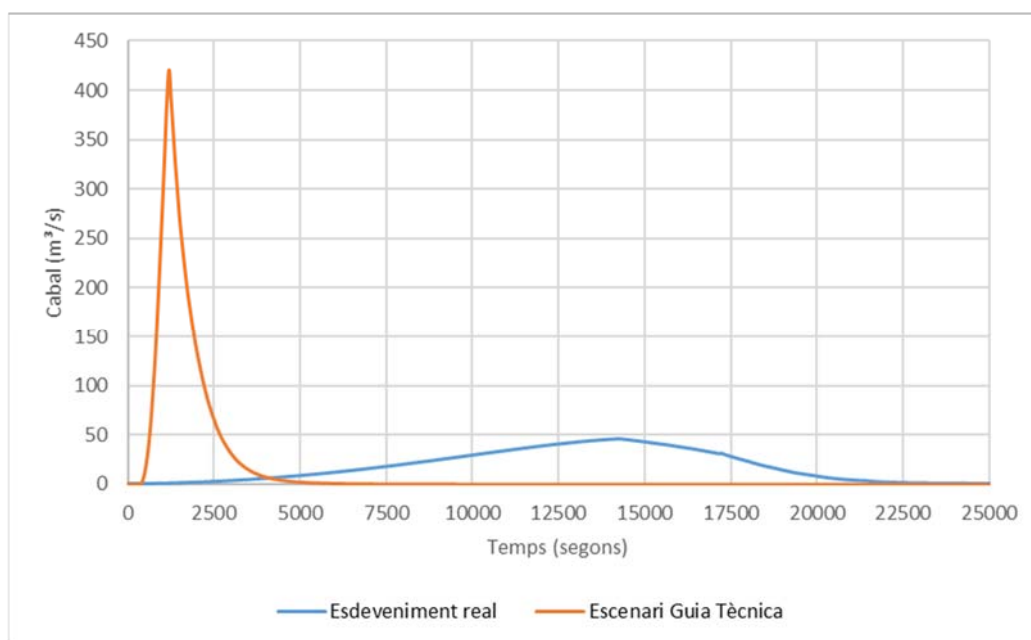


Figura 64. Hidrogrames de trencament del terraplè de la bassa de reg segons l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica i l'esdeveniment real (Hipòtesi 2 de creixement de les dimensions del tub i $C_d = 0,58$) - Font: elaboració pròpia

A partir de la visualització de les corbes precedents és possible concloure el següent:

- L'hidrograma de trencament per mitjà del qual es reproduceix hidràulicament l'escenari del trencament real arriba a un cabal màxim de valor $45,67 \text{ m}^3/\text{s}$, als 14.280 segons del temps de modelització. Tenint en compte que l'hora considerada com a inici del trencament en aquest estudi és a les 5:41h, el cabal màxim es produiria a les 9:39h, que coincideix amb l'instant de temps en el qual s'arriba al diàmetre màxim del tub i a partir d'aquí es manté, tot disminuint el nivell d'aigua present dins la bassa de reg.
- L'hidrograma de trencament obtingut de la reproducció hidràulica amb el model Iber de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica assoleix un cabal pic de valor $420,75 \text{ m}^3/\text{s}$, a l'instant de temps de modelització 1.200 segons. Això equival a dir, si es considera la mateixa hora d'inici del trencament (5:41h), que el cabal màxim, suposant aquest escenari, es produiria a les 6:01h, és a dir, 3 hores i 38 minuts abans que en l'esdeveniment real.
- Malgrat l'extrema diferència en la forma dels dos hidrogrames, el volum d'aigua sortint fins a l'instant final de simulació és pràcticament el mateix. En l'escenari contemplat a la Guia

Tècnica es considera un nivell inicial de la làmina d'aigua a la cota 223,9 m.s.n.m., que coincideix amb la cota del Nivell Màxim Normal (N.M.N.) de l'embassament, mentre que en el cas de l'esdeveniment real es suposa un nivell inicial de la làmina d'aigua a la cota 224 m.s.n.m. (o sigui, entre els dos escenaris, el nivell inicial de la làmina d'aigua difereix només 10 centímetres). Tenint en compte que aquests 10 centímetres equivalen a 12.813 m³ d'aigua dels 806.808 m³ que té de capacitat màxima la bassa de reg (és a dir, només un 1,59% del volum a coronació) i que la cota inferior de la bretxa formada en els dos casos es troba a la cota 217,1 m.s.n.m. i 217 m.s.n.m. per a l'escenari contemplat a la Guia Tècnica i per a l'esdeveniment real, respectivament, es pot afirmar que el volum d'aigua desguassat a través de la bretxa és lleugerament superior en el cas de l'esdeveniment real, malgrat es poden considerar quasi idèntics atenent al gran volum d'aigua que és capaç d'emmagatzemar la bassa de reg.

- La principal diferència entre els dos hidrogrames recau en l'interval de temps en el qual surt el volum d'aigua emmagatzemat a l'interior de la bassa de reg. Mentre que en el cas del trencament real el volum d'aigua desguassat es reparteix més o menys uniformement durant pràcticament els 25.000 segons modelitzats, l'hidrograma de trencament resultant de la reproducció hidràulica amb el model Iber de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica demostra que tot el volum d'aigua emmagatzemat a l'interior de la bassa és desguassat en menys de 5.000 segons (o sigui, poc menys d'hora i mitja). És per aquest motiu que el cabal màxim entre els dos escenaris estudiats difereix tant significativament, ja que per desguassar pràcticament el mateix volum d'aigua (el volum correspon amb l'àrea compresa entre la corba que representa l'hidrograma i l'eix de les abscisses) és necessari un cabal molt superior en el cas de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica, en el que el temps de sortida de tota l'aigua emmagatzemada és molt més reduït (el producte d'un cabal pel temps és equivalent a un volum).

Adicionalment, la utilització d'hidrogrames de trencament del terraplè de la bassa diversos comporta diferències en les variables hidràuliques des d'un punt de vista temporal. Aquestes diferències s'observen clarament amb els resultats de les zones inundables als 30 minuts i a l'hora després de l'inici del trencament.

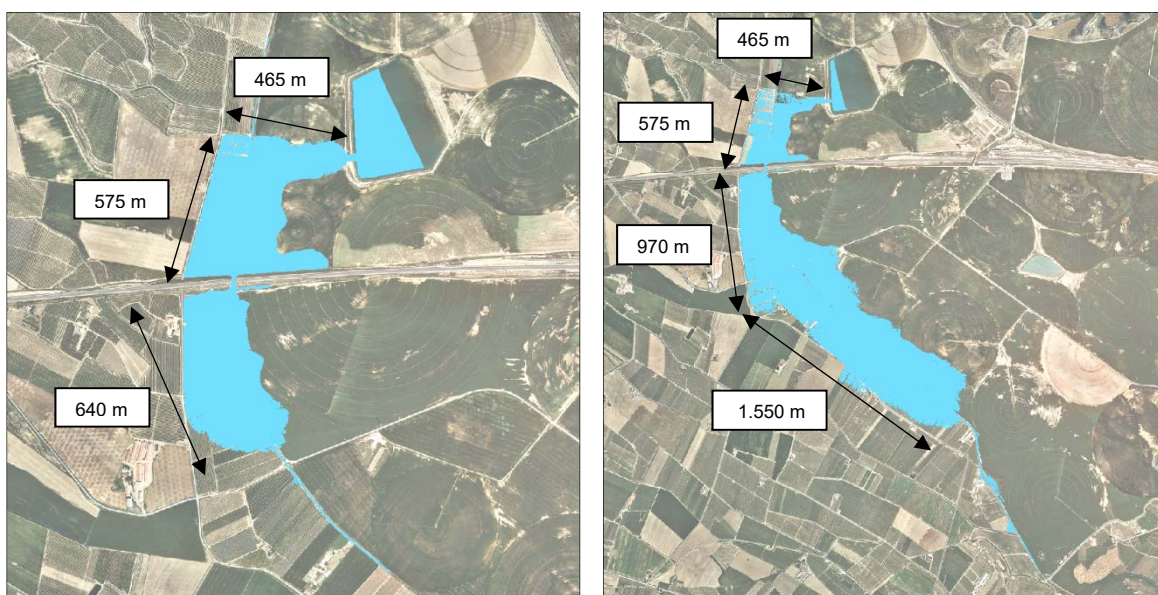


Figura 65. Zona inundable a la primera mitja hora després del trencament (esquerra) i zona inundable al cap d'una hora del trencament (dreta) – Escenari contemplat a la Guia Tècnica (Font: elaboració pròpia)

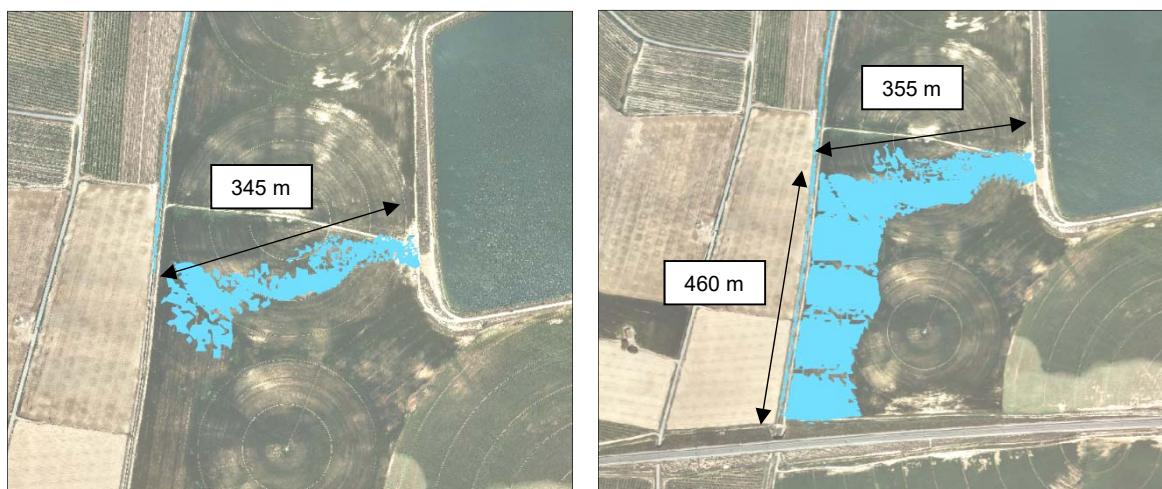


Figura 66. Zona inundable a la primera mitja hora després del trencament (esquerra) i zona inundable al cap d'una hora del trencament (dreta) – Esdeveniment real (Font: elaboració pròpia)

A la vista de les zones inundables representades a les figures precedents, es confirma el que ja s'ha explicat anteriorment per mitjà dels hidrogrames de trencament, i és que segons l'escenari de trencament hipotètic contemplat a la Guia Tècnica, el volum d'aigua que hauria sortit al cap de mitja hora i al cap d'una hora del trencament seria clarament superior al que hauria sortit en el cas de l'esdeveniment real. Així mateix, la distància aigua avall respecte de la bassa de reg a la que hauria arribat l'ona de ruptura al cap de mitja hora i d'una hora després de l'inici del trencament seria clarament superior en el cas de l'escenari de trencament segons la normativa, tal i com es pot observar a través de les distàncies especificades en les dues figures anteriors.

Pel que fa a l'escenari contemplat a la Guia Tècnica, als 30 minuts després del trencament, l'aigua ja hauria arribat a l'altura del pont del camí de Montagut. En canvi, en el cas de l'esdeveniment real, als 30 minuts després del trencament, l'aigua encara no hauria ni arribat a desguassar dins la llera canalitzada de la riera dels Reguers, i al cap d'una hora del trencament l'aigua hauria arribat tot just a l'altura del terraplè de la LAV Madrid-Barcelona.

A través de la gràfica que es mostra a la dreta és possible la comparació dels dos escenaris de trencament des del punt de vista del descens del nivell de la làmina d'aigua al llarg del temps a l'interior de la bassa.

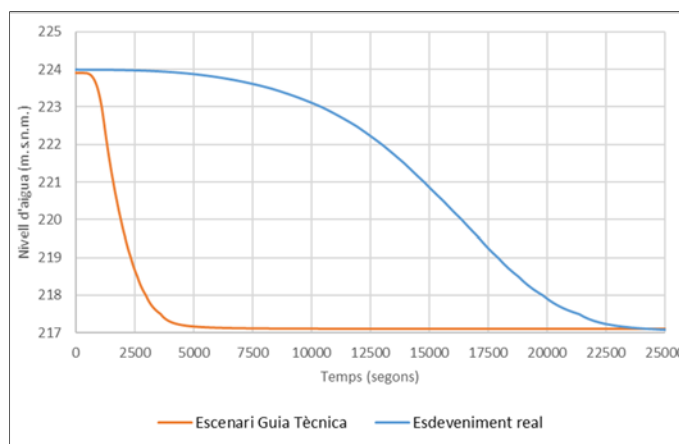


Figura 67. Nivell de la làmina d'aigua en funció del temps a l'interior de la bassa de reg segons l'Escenari contemplat a la Guia Tècnica i l'esdeveniment real (Font: elaboració pròpia)

Com es pot observar, el descens del nivell d'aigua a l'interior de la bassa es produeix molt més aviat en el temps i molt més ràpid (pendent de la corba taronja) en el cas de l'escenari de trencament hipotètic contemplat a la Guia Tècnica. En l'esdeveniment real, donada la forma i els valors de l'hidrograma de trencament del terraplè de la bassa, el descens del nivell és molt més lent i es prolonga fins quasi els 25.000 segons (temps de modelització), que equivalen a quasi 7 hores. En conclusió, es pot afirmar que aquestes corbes estan totalment en consonància amb els hidrogrames de trencament representats a la Figura 64 de més amunt.

Finalment, i per concloure aquest apartat a través del qual es desenvolupa una anàlisi comparativa dels resultats obtinguts de les simulacions hidràuliques dels dos escenaris de trencament estudiats, acte seguit es mostra una taula que té la finalitat de resumir les característiques de la propagació de l'ona de ruptura al llarg del temps aigua avall de la bassa de reg i fins al riu Segre, pels dos escenaris de trencament estudiats. S'han considerat set seccions d'anàlisi distribuïdes més o menys uniformement al llarg de l'àmbit d'estudi, que corresponen amb diverses ubicacions on hi ha present algun element destacable, com poden ser per exemple les tres grans infraestructures lineals que creuen l'àmbit d'estudi i la riera dels Reguers. S'especifica, per a cadascun dels dos escenaris de trencament i per a cada secció analitzada, l'instant temporal d'arribada de l'ona de trencament, així com l'instant de temps en el qual es produeix el cabal màxim i el valor d'aquest cabal. Finalment, a la darrera columna, es mostra la diferència en tant per cent entre els cabals màxims que es registrarien a les diferents seccions analitzades, a fi i efecte de poder observar la notable diferència existent entre els dos escenaris estudiats.

UBICACIÓ SECCIÓ ANALITZADA	PK (Distància aigua avall de la bassa)	ESCENARI TRENCAMENT GUIA TÈCNICA			ESCENARI TRENCAMENT REAL			DIFERÈNCIA ENTRE CABALS MÀXIMS
		Instant arribada ona de ruptura	MÀXIM		Instant arribada ona de ruptura	MÀXIM		
			Cabal (m³/s)	Instant de temps		Cabal (m³/s)	Instant de temps	
Aigua amunt LAV Madrid- Barcelona	0+750	17 min	179,64	31 min	55 min	43,73	4 h i 8 min	75,66%
Camí de Montagut	1+500	25 min	162,99	42 min	1 h i 22 min	42,01	4 h i 25 min	74,23%
Confluència Sèquia-Riera dels Reguers	4+340	1 h i 1 min	119,55	1 h i 35 min	2 h i 8 min	42,06	5 h i 22 min	64,82%
Aigua amunt Autovia A-2	6+500	1 h i 41 min	84,23	2 h i 13 min	2 h i 59 min	38,44	6 h i 8 min	54,36%
Zona OD_12	8+330	2 h i 20 min	77,62	2 h i 38 min	4 h i 4 min	36,76	6 h i 44 min	52,65%
Aigua amunt Carretera N-II	9+800	2 h i 46 min	32,80	3 h i 50 min	4 h i 56 min	27,63	7 h i 52 min	15,78%
Desembocadura riera dels Reguers al riu Segre	10+840	3 h i 16 min	32,46	4 h i 16 min	5 h i 40 min	27,57	8 h i 10 min	15,05%

Taula 8. Característiques de l'ona de trencament a diferents seccions distribuïdes al llarg de l'àmbit d'estudi segons l'Escenari de trencament considerat - Font: elaboració pròpia

Com es pot observar a través de la taula precedent, els dos escenaris objectes d'estudi difereixen de forma considerable, tant pel que fa a la magnitud del cabal màxim produït com en els instants de temps d'arribada de l'ona de ruptura i els instants en el qual es produeix el cabal màxim. Globalment, en aquest cas concret, es pot afirmar que l'escenari de trencament que contempla la Guia Tècnica és molt més crític pel que fa a l'instant d'arribada de l'ona de ruptura a les diferents ubicacions situades aigua avall de la bassa de reg, donat que l'aigua hi arribaria molt més aviat. De la mateixa manera, el cabal màxim que fluiria al llarg de l'àmbit d'estudi seria clarament superior, notant-se més aquesta diferència entre escenaris a la zona situada més aigua amunt, és a dir, més propera a la bassa de reg, on s'arribaria a produir una diferència de quasi el 76% entre cabals màxims. A més, a part d'això, l'instant temporal en el qual es produiria el cabal màxim seria

molt més aviat en el temps en el cas de considerar el trencament segons l'escenari de la Guia Tècnica, resultant una diferència de 3 hores i 37 minuts entre els dos escenaris a la secció d'aigua amunt de la LAV Madrid-Barcelona. Quant a la secció situada més aigua avall, tocant ja a la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre, la diferència temporal entre els instants que es produirien els màxims pels dos escenaris estudiats seria de 3 hores i 54 minuts.

La gràfica que es mostra a continuació representa a l'eix d'ordenades els valors del cabal màxim que es registrarien a les diferents seccions de l'àmbit d'estudi analitzades, mentre que en l'eix de les abscisses hi figura el punt quilomètric (PK), seguint l'eix de la llera de la riera dels Reguers, des de la bassa de reg fins a la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre.

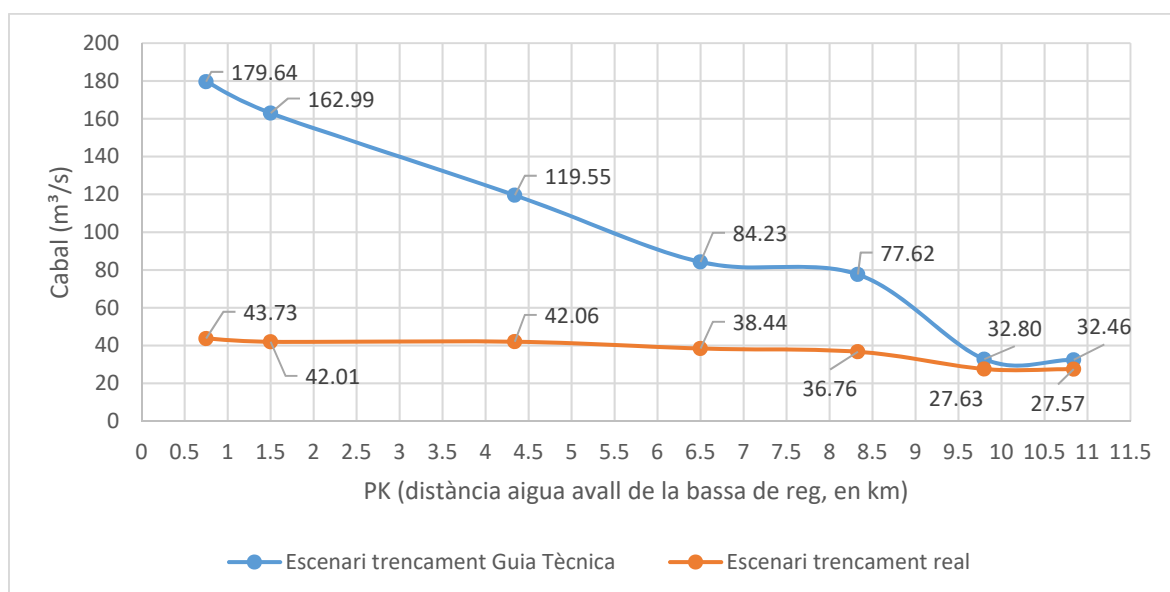


Figura 68. Cabal de l'ona de trencament en funció del PK segons l'Escenari de trencament considerat - Font: elaboració pròpia

La gràfica precedent confirma el que ja s'havia comentat anteriorment, i és que els cabals de l'ona de trencament obtinguts de la reproducció hidràulica de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica serien molt més elevats (entre un 15 i un 76% aproximadament) en comparació amb els que van succeir realment el dia 20 d'abril del 2012 durant l'episodi de trencament de la bassa de reg "el Pantà Gran", escenari que es reproduïx hidràulicament en aquest estudi a partir de la consideració d'una sèrie d'hipòtesis. La diferència entre els escenaris és màxima a l'àmbit proper a la bassa de reg i aigua amunt del terraplè de la LAV, mentre que s'aniria reduint a mesura que s'avança en la direcció d'aigua avall, registrant-se una diferència de només el 15,05% a la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre.

És destacable també la gran capacitat de laminació de les planes d'inundació de la riera dels Reguers i la capacitat de retenció de les diferents infraestructures lineals que creuen la riera dels Reguers mitjançant una estructura en terraplè, donat que, en el cas de l'escenari de trencament contemplat a la Guia Tècnica, la disminució del cabal al llarg de les diferents seccions analitzades seria bastant destacable (el pendent de la corba blava és major que el de la corba taronja), resultant un decrement entre la secció de més aigua amunt i la de més aigua avall de 147,18 m³/s. En canvi, considerant l'escenari del trencament real, aquest decrement es quantificaria en només 16,16 m³/s.

9. Documents que integren l'estudi

Els documents integrants del present "Estudi del trencament produït a l'abril del 2012 de la bassa de reg "el Pantà Gran" a Alcarràs" que es resumeix en la present memòria i que es desenvolupa en els seus diferents annexos, són els que s'enumeren a continuació:

MEMÒRIA

ANNEXOS

Annex núm. 1: Reportatge fotogràfic

Annex núm. 2: Reconstrucció cronològica de l'esdeveniment

Annex núm. 3: Anàlisi geotècnica

Annex núm. 4: Anàlisi hidràulica

Annex núm. 5: Plànols

L'índex de l'Annex núm. 5 de plànols és el següent:

ÍNDEX GENERAL		Núm. fulles
1	Situació i índex general	1
2	Emplaçament i plànol guia	1
3	Model Digital del Terreny	9
4	Distribució dels usos del sòl	9
5	Reconstrucció de l'esdeveniment i zones afectades per les inundacions	9
6.1	Delimitació de zones inundables. Hipòtesis trencament real	9
6.2	Mapa de calats màxims. Hipòtesis trencament real	9
6.3	Mapa de velocitats màxims. Hipòtesis trencament real	9
6.4	Risc d'inundació. Hipòtesis trencament real	9
6.5	Zona inundable a la primera mitja hora. Hipòtesis trencament real	1
6.6	Zona inundable a la primera hora. Hipòtesis trencament real	1
7.1	Delimitació de zones inundables. Trencament segons la Guia Tècnica	9
7.2	Mapa de calats màxims. Trencament segons la Guia Tècnica	9
7.3	Mapa de velocitats màxims. Trencament segons la Guia Tècnica	9
7.4	Risc d'inundació. Trencament segons la Guia Tècnica	9
7.5	Zona inundable a la primera mitja hora. Trencament segons la Guia Tècnica	1
7.6	Zona inundable a la primera hora. Trencament segons la Guia Tècnica	1
8.1	Comparativa de zones inundables. Trencament real - Trencament Guia Tècnica	9
8.2	Diferència de nivells. Trencament real - Trencament Guia Tècnica	9
8.3	Diferència de velocitats. Trencament real - Trencament Guia Tècnica	9
8.4	Comparativa zona inundable als 30 minuts. Trencament real - Trencament Guia Tècnica	1
8.5	Comparativa zona inundable a la hora. Trencament real - Trencament Guia Tècnica	1

10. Futurs estudis

Aquest document se centra en reproduir hidràulicament el mecanisme real de trencament de l'estructura del terraplè de la bassa de reg a partir d'una sèrie d'hipòtesis inicials. Es crea un **model hidràulic simplificat** que, a partir de suposar un cert patró temporal d'evolució de les dimensions del tub semicircular format a través del terraplè, permet calcular el cabal de sortida en qualsevol instant de temps, a més d'altres variables com podrien ser el nivell de la làmina d'aigua dins la bassa o bé la velocitat de sortida de l'aigua a través de l'orifici format. Una vegada obtingut l'hidrogràma de trencament real, es realitza un model hidràulic bidimensional amb el programari Iber que reproduceix l'evolució de l'ona de trencament al llarg de l'àmbit d'estudi.

El model hidràulic simplificat ideat específicament pel present estudi conté diverses **simplificacions**, entre les quals destaquen les següents:

- El model desenvolupat es basa únicament en principis de la **hidràulica**, no tenint en compte ni el **transport de sediments** ni la **mecànica de sòls**.
- L'orifici o tub format al llarg del terraplè de la bassa de reg, malgrat haver-se vist que tenia una forma aproximadament semicircular, per a simplificar els càlculs s'ha suposat que la secció dins el tub on es produeix el règim crític té forma **rectangular**.

Així doncs, per a reproduir de forma més realista la formació i progressió de l'esvoranc i tenir en compte més factors a part de principis de la hidràulica, es proposa com a futura línia d'investigació utilitzar un dels **models disponibles a la literatura tècnica que reproduïxen processos de ruptura de preses de terres** (per exemple, el model HR BREACH).

El model HR BREACH (HR Wallingford) és un model numèric de base física per a la simulació de la iniciació i formació de bretxes a través de preses de terres. Permet reproduir dos modes de trencament: per rebasament (*overtopping*) i per tubificació (*pipiing*). Va ser desenvolupat originalment el 1998 i s'ha millorat i perfeccionat des d'aleshores a través de diversos programes d'investigació. El codi del model original va ser desenvolupat per Mohamed (Mohamed, 2002). El model es basa en els principis de la hidràulica, el transport de sediments (erosió del material del terraplè) i la mecànica de sòls (estabilitat de talussos, de la pròpia bretxa i del terraplè en general).

Així mateix, una altra línia d'investigació futura podria ser anar més enllà de la modelització numèrica del procés real de trencament de l'estructura del terraplè de la bassa de reg objecte d'estudi, i **crear un model reduït al laboratori** que reproduïxi el comportament real de l'estructura de terres i el seu trencament per tubificació. Per tal de crear un bon model reduït, cal que les forces dominants actuant siguin les mateixes al model reduït que a la realitat, cosa que no vol dir que siguin iguals en valor (degut a l'efecte de l'escala de reducció), així com el nombre de Reynolds ha de ser elevat (ja que llavors la pendent motriu no depèn de la viscositat i les forces viscoses no tenen influència en el model reduït).

El present estudi ha estat desenvolupat íntegrament amb el model hidràulic bidimensional Iber. La darrera línia d'investigació que seria interessant desenvolupar, ja sigui per fer possible un contrast entre models i resultats, seria la utilització del **model HEC-RAS** que, en la seva versió actual 5.0.1, disposa d'una extensió que permet simular el flux d'aigua combinant models 1D/2D, així com totalment 2D. Aquest model basa la seva aplicació en les equacions d'Ona Difusiva i Sant Venant (a criteri de l'usuari), les quals resol mitjançant l'algorisme de Volums Finites Implícits.

11. Resum final i conclusions

Seguidament s'enumeren les principals conclusions que s'extreuen d'aquest estudi referent al trencament produït a l'abril del 2012 de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs:

- El dia 20 d'abril del 2012 la bassa de reg "el Pantà Gran", ubicada al nord del T.M. d'Alcarràs (Segrià), **va patir un episodi de trencament** parcial d'un dels seus terraplens, produint-se el buidat accidental i sobtat de la bassa i les conseqüents afeccions pel front d'avinguda generat a diverses vies de comunicació, a enormes extensions de camps de conreu i a algunes edificacions de diversos usos, fins a la confluència entre la riera dels Reguers i el riu Segre.
- La bassa de reg "el Pantà Gran" es troba ubicada en una **zona agrícola i ramadera**. En cas de trencament, la principal llera receptora és la **riera dels Reguers**, la qual desemboca al riu Segre uns 11 km aigua avall de la ubicació de la bassa de reg objecte d'estudi (en aquest tram té un pendent mig aproximat del 0,83%). Al llarg del seu recorregut, la riera dels Reguers es veu interceptada per diverses infraestructures lineals construïdes en terraplè. La **LAV Madrid-Barcelona** és la que es troba més propera a la bassa de reg, situant-se uns 310 m aigua avall d'aquesta. Més aigua avall hi ha emplaçades l'**Autovia A-2**, i a l'alçada del nucli urbà d'Alcarràs, la **carretera N-II**.
- El dic de contenció de la bassa de reg està construït a partir de materials solts (**argila**) en tota la seva secció, i disposa d'una capa de material drenant a la base del talús exterior del terraplè, per tal de drenar les filtracions d'aigua. L'altura màxima del dic de contenció de la bassa és de **9,6 metres**, sobre el terreny natural exterior. La cota del fons de la bassa és la 217 m.s.n.m., la cota del N.M.N. és la 223,9 m.s.n.m. i la cota del N.A.E. és a la 226,7 m.s.n.m., que coincideix amb la cota de coronació del terraplè de la bassa de reg. La capacitat màxima de l'embassament és de 806.808 m³.
- La base a partir de la qual ha estat possible el desenvolupament del present estudi és la disposició de diversa **informació fotogràfica i descriptiva** relativa a l'esdeveniment. De forma resumida el procés de trencament reconstruït va ser el següent:
 - **5:42h**: detecció d'un vòrtex en la làmina d'aigua que confirmava el trencament del dic de contenció. L'aigua sortia cap a l'exterior de la bassa a través d'un tub format per erosió interna en la fonamentació del dic de terres.
 - Entre les **9:28h i les 9:32h**: es mantenien estables els talussos del terraplè, malgrat que l'aigua sortia a través d'un tub que progressivament havia anat augmentant les seves dimensions.
 - Entre les **9:32h i les 9:39h**: el canvi va ser més que notable, ja que va cedir gran part del material que formava el dic de contenció de la bassa, en excepció d'una part del talús exterior que es mantenia estable, per on sortia l'aigua a través d'un tub de suposades grans dimensions.
 - **10:54h**: la bretxa seguia tenint un aspecte similar al de les 9:39h, amb una secció semicircular de sortida d'uns 5 m de diàmetre. Des d'aquest instant i fins al moment en que va deixar de sortir aigua de l'interior de la bassa no es va produir cap mena de modificació en la secció de sortida.

- En base a l'estudi "*Analysis of earth dam failures – A database approach*", es conclou que les causes més comunes de trencament de preses de terres són el **rebasament** (*overtopping*) -per a preses de materials solts amb nucli- i la **tubificació** (*pipiing*) -per a preses de material homogeni o zonificades- en el cos o en la fonamentació de la presa.
- S'han descrit els diferents mecanismes de trencament en preses de terres, focalitzant l'interès en el trencament per **tubificació** (ja que va ser el que es va produir al terraplè de la bassa de reg "el Pantà Gran") i en el trencament per **rebasament** (que és l'altre tipus més comú de trencament). Així mateix, s'ha fet un breu esment dels altres mecanismes de trencament en preses de terres: per esquarterament, pel lliscament de talussos, degut a un sisme, per líquefacció i degut a pèrdues per filtració.

La **tubificació és la formació, per erosió regressiva, d'un conducte a través de la presa o dels seus fonaments**. En el moment en que es produeix arrossegament, comença la tubificació. L'aigua flueix a través del sòl, la càrrega hidràulica es dissipa de manera que supera les forces viscoses que s'oposen al flux entre els canalicles formats per les partícules, i les partícules són arrossegades en la direcció del flux. Una compactació insuficient del terraplè contribueix de forma molt rellevant a la tubificació. Tot i això, la tubificació per sota del terraplè en el terreny natural és encara més freqüent, donat que els sòls naturals tenen una estratificació més erràtica i poden contenir estrats permeables. Es recomana utilitzar sòls fins plàstics per tal d'evitar la tubificació, ja que tenen una alta resistència a l'arrossegament, així com homogenis, amb un pes suficient, i utilitzar filtres graduats aigua avall.

- El trencament de la bassa es va desencadenar a partir d'una **filtració** al voltant de la zona de contacte entre el terraplè i el terreny natural en una de les seccions de més alçada del terraplè. La causa principal de l'aparició d'aquesta via preferent de filtració s'ha pogut conèixer gràcies a la consulta de la Memòria de reparació del terraplè de la bassa de reg (maig del 2012), proporcionada per l'Ajuntament d'Alcarràs, en la qual s'especifica que, d'acord a les anàlisis del terreny, en resulta que el material del dic es trobava format per argiles i la base de la bassa per argiles sota les quals existeix un terreny amb contingut en guix. De la presa de mostres es va poder observar l'existència d'una **capa de diferent permeabilitat** que va ser travessada per la làmina d'aigua generant un tub. L'aigua passant al seu través va aconseguir erosionar el material provocant que el dic es trenqués per la zona debilitada. El trencament es va produir, doncs, a causa de la formació d'un conducte a partir d'un **procés d'erosió interna regressiva des d'aigua avall cap aigua amunt**.
- S'ha fet referència a l'estat actual del coneixement dels quatre tipus o mecanismes d'erosió interna en estructures de terres: **ruptura o fractura hidràulica, erosió en sòls dispersius (sufusió), tubificació o erosió regressiva, i erosió per contacte**.

De forma general, l'erosió en estructures de terra a causa d'un flux d'aigua es produeix quan les forces resistents a l'erosió són inferiors a les forces de filtració que tendeixen a produir-la, de tal manera que les partícules de sòl són retirades i transportades juntament amb el flux d'aigua. Les forces resistents depenen de la cohesió, del fregament entre partícules, l'efecte d'enclavament, el pes de les partícules del sòl i el tipus de protecció existent aigua avall, en cas d'existir.

- Els principals factors influents en el fenomen de l'erosió del sòl són: a) l'**erosionabilitat** del sòl; b) la **velocitat de l'aigua** dins de la massa de sòl; c) la geometria de l'estructura del sòl, és a dir, la **forma i mida dels seus grans**. L'erosionabilitat del sòl depèn de diversos factors, com ara el contingut d'aigua, l'índex de plasticitat, la resistència en condicions no drenades, la mida mitjana de gra, el contingut del sòl en minerals d'argila, pH de l'aigua i del sòl, entre altres factors. Les forces de filtració que afecten el problema de l'erosió estan relacionades amb el gradient hidràulic que hi ha en la massa del sòl.
- S'han presentat diversos **procediments i recomanacions pràctiques per a la prevenció de danys deguts a l'erosió del sòl**. Entre ells es troben: a) Obtenir la millor selecció de materials de construcció disponibles; b) Controlar la homogeneïtat dels materials durant el procés de construcció; c) Utilitzar zones de transició entre els materials grollers i fins; d) Utilitzar filtres i drenatges dissenyats adequadament a totes les zones del terraplè exposades a les accions perjudicials de l'aigua, ja sigui en la fonamentació o al voltant del nucli impermeable.
- El principal objectiu de l'anàlisi hidràulica ha estat **corroborar i contrastar els supòsits teòrics (hipòtesis i metodologies de càlcul) que s'empren en els estudis hidràulics convencionals de trencament de grans basses amb un cas real de trencament recent del qual es disposen de dades suficients per al seu contrast**, per mitjà de la modelització hidràulica i posterior tractament dels resultats del cas hipotètic H1 de trencament trapezoïdal recollit a la "*Guía Técnica de Clasificación de presas en función del riesgo potencial*", així com de l'esdeveniment real de trencament.
- S'ha seleccionat el model numèric per a la propagació de l'ona de trencament a partir de les **característiques orogràfiques** de l'àmbit de terreny a modelitzar. Degut a la component bidimensional del flux resultant del trencament de la bassa, a causa de la **inexistència de lleres estrictament definides i la presència d'àmplies planes d'inundació**, s'ha optat per l'elecció del model hidràulic 2D Iber.
- Les dades de partença necessàries per a la creació del model hidràulic han estat: a) **Model Digital del Terreny** de l'àmbit d'estudi (creat a partir dels punts LIDAR), incloent-hi les edificacions i el vas de la bassa; b) **zonificació dels usos del sòl** (MCSC, 2009), per tal d'establir els valors dels coeficients de rugositat de Manning associats a cada ús del sòl; c) inventari (ubicació i característiques geomètriques) de les diferents **estructures** (ponts, obres de drenatge, passos inferiors, etc.) presents al llarg de l'àmbit d'estudi; d) **condicions inicials** (nivell d'aigua a l'interior de la bassa), **condicions de contorn** (hidrogrames d'entrada) i **paràmetres de càlcul** del model hidràulic bidimensional.
- La reproducció de l'**escenari contemplat a la Guia Tècnica** ha consistit únicament i exclusiva en modelar l'**escenari de trencament sense avinguda (H1)**, ja que la bassa no té conca aportadora (està situada fora del Domini Públic Hidràulic).

Pel que fa a la bretxa de trencament analitzada, s'han seguit les prescripcions de la **Guia Tècnica** pel que fa a la forma i les dimensions màximes de l'esvoranc (trapezial amb talussos 1H:1V i ample mig de 28,51 metres), així com la seva evolució al llarg del temps de trencament (19,68 minuts).

- En el present estudi s'han presentat i desenvolupat dues maneres diferents d'obtenir l'hidrograma de sortida resultant del trencament del terraplè de la bassa de reg segons l'escenari de trencament H1 contemplat a la Guia Tècnica. El primer mètode ha consistit en **extreure directament els resultats del model 2D Iber**, ja que és un model que permet simular la formació de bretxes en basses d'una forma molt realista, a partir de l'assignació d'una condició inicial de nivell d'aigua al seu interior. El segon mètode, en canvi, s'ha basat en la **creació d'un model hidràulic original en un full de càlcul**, a partir de la consideració de diverses formulacions referents al cabal de sortida pel sobreexidor en làmina lliure format.

Dels resultats obtinguts dels dos mètodes es pot afirmar que els dos hidrogrames són bastant similars. L'hidrograma obtingut a partir del model hidràulic propi té un cabal punta més elevat (455,72 m³/s), mentre que l'obtingut a partir del model Iber és de 420,75 m³/s (7,7% inferior). Malgrat aquesta diferència, els instants de temps en que es produeixen respecte a l'inici de la formació de la bretxa coincideixen relativament (1.180 segons -model propi-, front els 1.200 segons -model Iber-). En resum, els resultats reflecteixen la **bondat i validesa** dels dos mètodes utilitzats.

- En el present estudi s'ha efectuat una **anàlisi de sensibilitat** amb l'objectiu d'identificar l'impacte que resulta en els resultats del problema original (modelització 2D Iber del cas de trencament hipotètic H1 contemplat a la Guia Tècnica) després de variar la **resolució espacial** que caracteritza el Model Digital del Terreny. L'anàlisi comparativa s'ha realitzat entre un **MDT de pas de malla 1x1 m²** i un altre de **1,4x1,4 m²**.

De la diferència de nivells d'aigua entre els dos casos s'ha conclòs que els dos models proporcionen resultats bastant similars a tot arreu, excepte en les zones amb canvis bruscs de secció, on la secció més estreta tingui unes dimensions similars als de la resolució de la mida de malla. S'han detectat diferències significatives en el **pas inferior de vehicles** existent sota la carretera N-II, que provoquen una reducció de la capacitat de desguàs i causen un augment irreal del nivell de la làmina d'aigua en la zona just aigua amunt de la carretera N-II. El MDT 1x1 m² és el que representa amb més exactitud les dimensions reals del pas inferior.

- Per a reproduir l'**esdeveniment real** i, en definitiva, conèixer l'hidrograma real de sortida resultant del trencament del terraplè (entre d'altres variables), **s'ha ideat i creat un model hidràulic simplificat, original i de forma específica pel cas objecte d'estudi**. El model es basa en la utilització de dues formulacions diferents pel càlcul del cabal de sortida segons quin sigui el nivell d'aigua a l'interior de la bassa i la cota de la part superior del tub format a partir del procés d'erosió interna. En concret, s'utilitza una formulació que permet calcular el cabal desguassat per un **orifici** quan el nivell d'aigua dins la bassa està per sobre de la cota de la part superior del tub, mentre que s'usa una formulació basada en la presència d'una **secció en règim crític** dins l'orifici (es produeix un calat crític, ja que es passa de règim lent dins la bassa a règim ràpid a dins el tub) quan el nivell de l'aigua a la bassa està per sota de la cota de la part superior del tub (flux en làmina lliure).

- Pel desenvolupament de l'escenari de trencament real ha estat necessari realitzar una sèrie d'**hipòtesis**, entre les quals figuren: a) suposar en diversos instants de temps el nivell d'aigua a l'interior de la bassa, a partir de l'observació de diverses fotografies del mateix dia del trencament i; b) definir i estudiar 5 possibles patrons de creixement del tub format al terraplè de la bassa degut al seu trencament. De les 5:42h a les 9:39h es desconeix el patró real de creixement de les dimensions del tub, de tal manera que és entre aquests instants de temps quan difereixen entre elles les cinc hipòtesis realitzades. A partir de les 9:39h s'ha considerat que el tub semicircular format manté sempre més constant el seu radi (de valor 2,5 metres).
- De l'aplicació del model hidràulic simplificat creat expressament per a la reproducció de l'esdeveniment real, utilitzant les 5 hipòtesis diferents d'augment de les dimensions del tub, es conclou que **les dues hipòtesis que s'adeqüen millor a la realitat succeïda el dia 20 d'abril del 2012 són les Hipòtesis 2 i 3** (funcions de creixement lineal i lleugerament convexa, respectivament). El grau d'adequació a la realitat de cadascuna de les hipòtesis s'ha determinat a partir de la comparació de la corba resultant del nivell de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa amb els valors hipotètics de referència referents al nivell de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa en diversos instants de temps coneguts a partir de l'observació de diverses fotografies.

En el cas particular objecte d'estudi, semblaria lògic interpretar l'orifici generat com un de **paret gruixuda**, ja que es verifica la condició $e > 3a$, essent e l'espessor en el sentit transversal del terraplè i a el diàmetre del tub generat, que va arribar a un màxim de 5 metres. No obstant això, considerant un valor teòric per al **coeficient de descàrrega** $C_d = 0,82$ (típic d'un orifici de paret gruixuda), apareix una **incongruència en forma de salt sobtat** del cabal en els propis hidrogrames, en el moment en que el nivell d'aigua dins la bassa s'igualava o quedava just per sota de la cota de la part superior del tub format a causa del trencament. Per corregir aquest desajust, s'ha **calibrat** el valor del coeficient de descàrrega obtenint un valor de major ajust de **0,58** que elimina el citat salt en el cabal.

- Una vegada definides les Hipòtesis 2 i 3 com les més representatives de la realitat, s'ha modelitzat hidràulicament pels dos casos **la propagació de l'ona de trencament aigua avall de la bassa de reg i fins al riu Segre**, per tal de veure si les inundacions produïdes coincidien en major o menor mesura amb les produïdes realment durant el dia 20 d'abril del 2012, així com poder comparar els resultats obtinguts de la consideració d'hipòtesis diferents d'augment de les dimensions del tub.

Dels resultats de les modelitzacions hidràuliques amb les Hipòtesis 2 i 3 es desprenen diverses conclusions, entre les quals destaquen: a) les **diferències de nivells** són poc significatives, fent-se més notables a les zones d'aigua amunt dels terraplens de les tres grans infraestructures (màxim d'11 cm); b) les **zones inundables** són pràcticament coincidents en els dos escenaris estudiats; c) la **diferència de nivells** és deguda únicament al diferent hidrograma de trencament introduït al model 2D Iber (els nivells d'aigua són majors en el cas de considerar la Hipòtesi 3, ja que el valor del cabal punta és un 10,77% més elevat que en el cas de la Hipòtesi 2); d) el **volum d'aigua** que hauria sortit al cap de mitja hora i al cap d'una hora del trencament seria superior en el cas de la Hipòtesi 2.

Quant a les afeccions produïdes i a l'extensió de la inundació, els dos models hidràulics bidimensionals creats amb la finalitat de reproduir l'esdeveniment real s'adeqüen bastant bé a l'esdeveniment estudiat (bona coincidència amb els polígons que identifiquen les zones afectades per les inundacions durant el dia 20 d'abril del 2012). Atenent a això, l'única variable que pot ajudar a la presa de la decisió final sobre quin dels cos casos modelats és més idoni i s'adequa millor a la realitat ocorreguda correspon amb el **nivell de la làmina d'aigua a l'interior de la bassa**, i aquesta variable dictamina que el patró d'augment de les dimensions del tub més probable i que reproduceix amb més exactitud els fets del trencament real ocorregut és la **Hipòtesi 2** (pel fet que a les 10:54h del dia 20 d'abril del 2012 el nivell de la làmina d'aigua es trobava suposadament a la cota 218,5 m.s.n.m.).

- És condició necessària que el patró de creixement del tub compleixi amb els nivells d'aigua observats a l'interior de la bassa, no obstant això, **no és condició suficient**, ja que ha calgut veure que les afeccions aigua avall de la bassa i fins a la desembocadura al riu Segre corresponguessin amb les que van succeir realment durant el dia 20 d'abril del 2012.
- Per tal de **contrastar les hipòtesis i metodologies de càlcul que s'empren en els estudis convencionals de trencament de grans basses amb el cas real de trencament de la bassa de reg "el Pantà Gran"**, s'ha realitzat una anàlisi comparativa entre els resultats obtinguts de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica i de l'esdeveniment real (considerant la Hipòtesi 2 d'augment de les dimensions del tub).

De la comparació dels resultats de les modelitzacions hidràuliques de cada escenari es desprenen diverses conclusions, entre les quals destaquen: a) les **diferències de nivells** són molt significatives, fent-se més notables a les zones d'aigua amunt dels terraplens de les tres grans infraestructures (**màxim de 2,22 metres** aigua amunt de la LAV), així com anirien disminuint a mesura que el punt d'estudi es troba situat més aigua avall; b) les **zones inundables** coincideixen relativament poc en l'àmbit situat entre la bassa de reg i l'Autovia A-2 (l'escenari contemplat a la Guia Tècnica comporta majors àrees inundables), mentre que una vegada superada l'Autovia A-2, les zones inundables coincideixen bastant fins al riu Segre; c) l'observada **diferència de nivells i de zones inundables** és deguda únicament al diferent hidrograma de trencament, que en el cas de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica té un pic de 420,75 m³/s, a l'instant de temps 1.200 segons, mentre que en el cas de l'escenari de trencament real, el cabal màxim és només de 45,67 m³/s (el 10,85% del màxim assolit en l'altre escenari) i es produiria als 14.280 segons (3 hores i 38 minuts de diferència entre pics); d) el **volum d'aigua** que hauria sortit al cap de mitja hora i al cap d'una hora del trencament seria clarament superior en el cas de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica, així com les zones afectades aigua avall de la bassa de reg (al cap d'una hora, l'ona de trencament ja hauria arribat uns 3 km aigua avall, mentre que en el cas de l'esdeveniment real, al cap d'una hora de l'inici del trencament, l'aigua tot just hauria arribat a l'alçada de la LAV).

- Per concloure l'estudi, i **per fer notar l'extrema diferència entre els dos escenaris de trencament**, s'han estudiat les característiques de la propagació de l'ona de trencament al llarg de l'àmbit objecte d'estudi pels dos escenaris de trencament estudiats. S'han analitzat set seccions diferents distribuïdes al llarg de l'àmbit d'estudi, en diverses ubicacions estratègiques. Els resultats confirmen la diferència entre els dos escenaris, **tant pel que fa a la magnitud del cabal màxim produït com en els instants de temps d'arribada de l'ona de trencament a les diferents seccions i els instant en el qual es produeix el cabal màxim**. L'escenari que contempla la Guia Tècnica és extremadament més advers en tots els sentits, produint cabals màxims superiors i temps d'arribada de l'ona de trencament molt més breus. Com a ordre de magnitud, a l'extrem d'aigua amunt del model, la diferència entre cabals màxims seria pròxima al 76%, mentre que la diferència es reduiria progressivament en el sentit d'aigua avall fins assolir una diferència de només el 15,05% a la desembocadura de la riera dels Reguers al riu Segre. Finalment, per tenir una idea de la magnitud de la diferència de temps pel que fa a l'arribada de l'ona de trencament, a la secció d'aigua amunt de la LAV Madrid-Barcelona, aquesta seria de 38 minuts entre els dos escenaris, mentre que el màxim, a la mateixa secció, es produiria 3 hores i 37 minuts abans en el cas de l'escenari contemplat a la Guia Tècnica.
- Queda demostrada, doncs, **la diferència d'escala existent (tant pel que fa a la magnitud com en termes temporals) entre els supòsits teòrics que s'empren en els estudis hidràulics convencionals de trencament de grans basses i la realitat del cas de trencament de la bassa de reg "el Pantà Gran" d'Alcarràs**. Sens dubte, resulta beneficiós i adequat que els estudis hidràulics requerits per a la classificació de les basses siguin més conservadors i contemplin els casos més desfavorables de trencament, donat que així els plans d'emergència (en cas que siguin necessaris) s'adequaran a un escenari de perill envolupant dels que realment poden succeir amb major probabilitat i molt probablement s'estarà del costat de la seguretat en el moment en que es produeixi un cas de trencament.

12. Referències bibliogràfiques

La bibliografia consultada es mostra a continuació:

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014). "Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos". Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol.30(1) pp.1-10

Bladé, E., Gómez-Valentín, M. (2006). Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones. Monograph CIMNE N°97. Barcelona, España.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. Ingeniería del Agua. Vol.18 (1), pp.68-79, ISSN: 1134-2196. Editor: Universitat Politècnica de València, Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua

Cedex i Flumen (2014). Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual de referencia hidráulico

Sánchez-Juny, M., Bladé, E., Puertas, J. (2005). Hidráulica. Edicions UPC

Guía Técnica para la clasificación de presas en función del riesgo potencial. (1997). [Madrid]: Ministerio de Medio Ambiente.

Martín Vide, Juan Pedro, Diéguez García, José Miguel. *Apunts de l'assignatura Obres Hidràuliques (Grau en Enginyeria Civil)*. Barcelona, 2014

Pablo Lucio Pérez Senderos (2015). Clasificación de balsas: revisión y aprobación de propuestas de clasificación. *Jornada "Seguridad en balsas de riego"*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Agència Catalana de l'Aigua (2003). Guia Tècnica. Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local

Agència Catalana de l'Aigua (2014). Criteris d'interpretació de la Guia tècnica de Classificació de preses en funció del risc potencial

Ing. Luis Pérez Farras (2005). Nociones sobre orificios y vertederos, tipos de escurrimiento uniforme en canales, remansos y resaltos, y su relación con la sedimentación y la corrosión en cloacas. Área de Hidráulica

Azevedo N., J. M. y Acosta A., G. Manual de Hidráulica. Sexta edición. Harla, S. A. de C. V. México, 1976.

Sotelo A., G., Hidráulica general. Volumen I, Editorial LIMUSA S.A. Sexta edición, México, 1982

Universidad del Cauca. Departamento de Hidráulica. Práctica III. Estudio y patronamiento de orificios y boquillas

Garrote de Marcos, L., Laguna Peñuelas, F. Análisis de los posibles hidrogramas producidos por la rotura de la presa de puentes. Jornada sobre la presa de Puentes.

REAL DECRETO 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril

Zhang, L., Xu, Y. and Jia, J. (2009). Analysis of earth dam failures: A database approach. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 3(3), pp.184-189.

MSc. Ing. Rolando Armas Novoa (2002). Criterios para diseñar presas de tierra: prioridad y secuencia. Taller nacional sobre fallos de presas de tierra. Ciudad de la Habana

Pardo de Santayana, Fernando (2010). Las presas de materiales sueltos y sus patologías. Jornada de Erosión Interna de Presas (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino)

Corominas Dulcet, Jordi. *Apunts de l'assignatura Enginyeria Geològica (Grau en Enginyeria Civil)*. Barcelona, 2014.

Rayano, Manuel. Fenómenos de tubificación en presas pequeñas de tierra. *Dpto. de Hidráulica - Facultad de Ingeniería - UNNE*

Raul Flores-Berrones and Norma Patricia Lopez-Acosta (2011). Internal Erosion Due to Water Flow Through Earth Dams and Earth Structures, Soil Erosion Studies, Dr. Danilo Godone (Ed.), ISBN: 978-953-307-710-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/soil-erosion-studies/internal-erosion-due-to-waterflow-through-earth-dams-and-earth-structures>

A. J. Brown, R. C. Bridle (2008). Progress in assessing Internal Erosion. *Ensuring reservoir safety into the future*. Thomas Telford, London.

U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation (2010). Dam Safety Risk Analysis Best Practices. Internal Erosion.

H. Mattsson, J. G. I. Hellström & T. S. Lundström. (2008). On internal erosion in embankment dams. A literature survey of the phenomenon and the prospect to model it numerically.

Internal erosion of existing dams, levees, and dikes, and their foundations. Volume 1: Internal erosion processes and engineering assessment (2013). [Paris]: International Commission on Large Dams.

Federal Emergency Management Agency (FEMA) (oct. 2011). Filters for Embankment Dams. Best Practices for Design and Construction

Bonelli, S., Brivois, O., Borghi, R. and Benahmed, N. (2006). On the modelling of piping erosion. *Comptes Rendus Mécanique*, 334(8-9), pp.555-559.

Bonelli, S., Brivois, O. (2006). Piping erosion: modelling. *European Working Group on Internal Erosion*, Stokholm. ERINOH project: Internal Erosion in Hydraulic Works

N. Zaki Alamdari, M. Banihashemi, A. Mirghasemi (2012). A numerical Modelling of Piping Phenomenon in Earth Dams. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol:6

Tony L. Wahl. (2013). Incorporating Breach Parameter Estimation and Physically-Based Dam Breach Modelling into Probabilistic Dam Failure Analysis. *U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation*

Morris, M. (2015). Breach Prediction: The HR BREACH, AREBA and EMBREA breach prediction models. *FEMA National Dam Safety Seminar*

Ajuntament d'Alcarràs (2012). Memòria valorada de la reparació de la bassa de reg

ingenierodelacrisis. (2012). *EROSIÓN INTERNA EN PRESAS. parte 1 y 2*. [online] Available at: <https://ingenierodelacrisis.wordpress.com/2012/06/04/erosion-interna-en-presas-una-putada-sin-ninguna-duda-part-1/>

Nacional, I. (2016). *Instituto Geográfico Nacional*. [online] Ign.es. Available at: <http://www.ign.es/ign/main/index.do>

Catalunya, I. (2016). *ICGC - Vissir3*. [online] lcc.cat. Available at: <http://www.icc.cat/vissir3/>

Creaf.uab.es. (2016). *Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya*. [online] Available at: <http://www.creaf.uab.es/mcsc/>

Iber.chebro.es. (2016). *GeoPortal Sitebro*. [online] Available at: <http://iber.chebro.es/geoportal/>